UNIVERSITE DE NEUCHATEL
FACULTE DES SCIENCES
INSTITUT DE GEOLOGIE
CENTRE D'HYDROGEOLOGIE (CHYN)

SPHINX: UN LOGICIEL DE SIMULATION EN HYDROGEOLOGIE APPLIQUEE.

UN EXEMPLE DE CONFIGURATION, ORIENTEE VERS LA RECHERCHE D'EAU EN MILIEU A POROSITE D'INTERSTICE.

THESE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de docteur es Sciences.

par

Laurent TACHER

Géologue
Hydrogéologue
originaire de Semur-en-Brionnais (France)

Soutenue le 29 Mai 1992 devant le jury d'examen composé de MM:

Prof. F. ZWAHLEN	Directeur de thèse, professeur d'hydrogéologie, Directeur du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel;
Prof. L. KIRALY	Directeur de recherche au Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel;
Prof. O. BESSON	Professeur de mathématiques à l'Institut de Mathématiques de l'Université de Neuchâtel;
Dr Y. EMSELLEM	Ingénieur en chef des mines, Directeur du GEOLAB, Sophia-Antipolis;
Dr W. HURLIMANN	Deputy Manager, COLENCO Ltd.

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

SPHINX: un logiciel de simulation en hydrogéologie appliquée. Un exemple de configuration orientée vers la prospection d'eau en milieu à porosité d'interstice.

de M. Laurent Tacher

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. F. Zwahlen, L. Kiraly, O. Besson, Y. Emsellem (Geolab, Sophia-Antipolis) et W. Hürlimann (Baden)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 28 septembre 1992

Le doyen:

A. Robert

A. Robert

RESUME

SPHINX est un logiciel de simulation à vocation pédagogique, orienté dans sa configuration actuelle vers la prospection d'eau en milieu à porosité d'interstice. C'est un jeu; les joueurs sont des étudiants en hydrogéologie à qui on demande de poursuivre un but dans un milieu fictif et avec des outils de prospection fictifs.

Par rapport à l'investigation des milieux réels, la différence fondamentale est que les régles du jeu sont fixées par les modéles que produit SPHINX; du point de vue de l'éléve, ce sont les modéles qui font foi, quelques soient les hypothéses simplificatrices nécessaires à leur production. L'éléve doit oublier la réalité et s'en tenir à la nature des modéles dont il dispose. Dans ces conditions, l'apport du logiciel à l'expérience pratique vaut l'aptitude des modèles à approcher le comportement des systèmes réels.

Les paramétres constituant le domaine fictif permettent de produire, à la demande de l'élève, des modéles géophysiques, hydrauligues ou géologiques apparentés aux sondages et trainés électriques, à divers types de sondages mécaniques, aux essais de pompage ou de traçage, etc. Le déroulement des opérations est gouverné par des contraintes budgétaires; le joueur doit constituer une offre qui, une fois acceptée par le logiciel, devient son budget, auquel est retranché par la suite le prix des diverses manipulations effectuées.

Un autre aspect de SPHINX tend à vérifier que l'élève ne commet pas d'erreur importante lors de son travail; une rubrique à part lui permet de consulter "l'œil du maître", c'est-à-dire demander l'avis du logiciel quant à une action qu'il souhaite engager. Pour concevoir un tel système d'appréciation, plusieurs approches ont été envisagées.

Enfin, SPHINX est conçu de manière à ce qu'il soit facile de changer le domaine fictif et d'ajouter ou de modifier un outil. Cet ensemble modulaire fonctionne de maniére autonome, sans nécessiter la présence d'un opérateur.

ABSTRACT

SPHINX is a pedagogical simulation software, related, in its current configuration, to water prospection in a porous medium. It is a game; players are students in hydrogeology wich are asked to reach a given goal in a fictive medium, with fictive prospecting tools.

With respect to real medias investigation, the main difference consists in that the rules of the game are fixed by the models built by SPHINX; from the student's point of view, only models are credible, whatever simplifying hypothesis. The student must forget reality and keep to the nature of the models at his disposal. Under these conditions, the software's contribution to practice is worth the aptitude of models to approach real systems behaviour.

Constitutive parameters of the fictive domain allow to build, on the student's request, geological, geophysical or hydraulical models related to boreholes, electrical sounding, resistivity profiling, pumping tests, flowmeter, etc. The sequence of operations is governed by financial constraints; each player must do an estimate of work to be done which, once accepted by SPHINX, becomes the budget. Later, each manipulation's price is substracted from this budget.

An other aspect of SPHINX attempts to verify that the student does not make important mistakes during his work. A special item allows to ask the software about any provided action. To build such a system, different approaches have been envisaged.

Finally, SPHINX is designed so that it is easy to exchange the fictive domain, modifying or adding a tool. This modular entirety is autonomous and works without the presence of any operator.

Index

Page

Chapitre premier

Introduction et définitions

1.1 Motivation

Bien que largement diversifiée et pluri-disciplinaire, il n'est pas d'aspect de la profession d'hydrogéologue qui ne trouve, directement ou indirectement, d'application sur le terrain. L'"hydrogéologie de terrain" constitue donc la finalité et le lien entre les nombreuses branches de la discipline.

Quelque soit le problème précis qu'il se propose de résoudre, l'hydrogéologue de terrain tend à se faire une image aussi juste que possible, sous l'aspect qui l'intéresse, du milieu naturel investigué. Pour cela, il dispose d'observations recueillies sur le terrain et d'outils de prospection, dont les enseignements sont autant de points d'ancrage. Or l'acquisition de ces données coûte cher, de sorte que la qualité de l'image créée dépend, pour un budget donné, du choix judicieux du lieu et de la nature des outils appliqués. C'est sur ce point, entre autres, qu'interviennent le raisonnement et l'expérience; l'hydrogéologue expérimenté parviendra fréquemment à son but en dépensant un budget limité. Il construira une image de qualité suffisante en sollicitant un effort financier minimum.

Cela signifie que l'expérience est un outil de prospection, en optimisant l'utilisation des autres outils. Elle est personnelle, difficilement transmissible et d'acquisition lente.

Un exercice sur un milieu et avec des outils simulés peut apporter aux étudiants en hydrogéologie une certaine expérience, acquise rapidement et sans dommage pour l'économie ou pour le milieu naturel. Un tel exercice tend donc à rendre meilleure et plus rapide la formation et prétend faire économiser de l'argent.

1.2 Fonctionnement global

On substitue au cadre naturel un cadre fictif et simplifié, stocké sur ordinateur, imposé à l'utilisateur. Afin de parvenir à un but imposé, des outils également simulés, sont à sa disposition. Il s'agit d'une représentation de ceux ordinairement utilisés dans la réalité (méthodes géoélectriques, forages, essais de pompage, etc). L'utilisateur applique les outils sur le domaine; une fois l'opération effectuée, le résultat lui est communiqué.

Puisque le domaine et les outils sont simulés, les conséquences d'erreurs de prospection, d'interprétation de résultats ou de mauvaises gestion du budget sont nulles et le participant n'a pas à les redouter. Cela signifie que n'étant pas confronté aux conséquences réelles de ses actes, il peut, durant l'exercice, procéder de manière désordonnée ou irréfléchie, sans qu'aucune observation ne lui soit faite. Dans ces

conditions, l'apport pédagogique est réduit, voire nul si l'élève a procédé de manière purement aléatoire. C'est pour cette raison que le système de simulation doit également contrôler en permanence le bien-fondé d'une action engagée. Il doit en outre entretenir un historique des manipulations effectuées par chaque utilisateur, qui a pour fonction de permettre une discussion avec des experts, en dehors du programme, pendant ou après l'exercice.

Le rôle de l'utilisateur est le suivant:
- Prendre connaissance du but des investigations, des conditions géographiques, géologiques de surface, climatiques,etc.
- Etablir un devis des travaux.
- Soumettre le devis au programme, qui l'analysera et éventuellement le refusera en réclamant des modifications. Une fois le devis établi, l'utilisateur doit s'y tenir.
- Dépenser le budget ainsi constitué afin d'atteindre le but poursuivi.

1.3 Plan de l'exposé

Les définitions relatives aux notions de schéma et de modèle, nécessaires à notre exposé, sont fournies dans ce même chapitre, au paragraphe suivant.

Le chapitre II indique le principe d'un système de prospection hydrogéologique simulée, son contenu minimum et les propriétés, notamment de modularité, qu'il convient de lui donner.

Au travers d'une configuration exemplaire, le chapitre III est une présentation du logiciel sous l'aspect conceptuel. Dans un premier temps, on expose la nature des modèles que peut produire le système. Par la suite, on s'intéresse au déroulement de la prospection, c'est à dire à la partie du logiciel qui tend à vérifier que l'utilisateur fait un bon usage de ces modèles. Des suggestions concernant les améliorations possibles, auxquelles nous n'avons pas eu le temps de procéder, apparaissent au fil des explications. Dans ce chapitre, une large utilisation de termes entre guillemets est faite; il font allusion à la terminologie des systèmes réels mais n'ont souvent pas de sens en termes de modèles. Leur utilisation permet toutefois d'expliquer simplement ce que le modèle tend à représenter. Un compromis acceptable est par exemple de parler de "forage" plutôt que de forage.

Dans le chapitre IV, on indique la manière dont le système est installé dans l'ordinateur. C'est donc une adaptation du chapitre III au langage de la machine, qui impose certaines restrictions implicitement prises en compte par le concepteur du système au chapitre précédent. Programmes et procédures sont décrits en détail à l'intention de ceux qui voudraient modifier un point précis du logiciel.

Le chapitre V constitue un guide destiné à toute personne souhaitant modifier ou échanger certaines parties du système, profitant de sa large modularité, dans les limites prévues de cette modularité. Il s'agit principalement des formalités de remplacement du domaine fictif et d'ajout d'outils de prospection. Si les modifications sont plus fondamentales, on se reportera au chapitre IV.

Enfin, le chapitre VI est rédigé à l'intention des utilisateurs, qui y trouveront un "SPHINX: Mode d'emploi", lequel est d'ailleurs reproduit dans le logiciel.

Les termes en **caractère gras** lors de leur première apparition dans le texte font l'objet d'une définition dans le glossaire.

1.4 Définitions de base

De prés ou de loin, l'activité de l'hydrogéologue se rapporte à la connaissance de systèmes réels (e.g des aquifères), puisque ces systèmes contiennent l'eau qu'il recherche, qu'il veut gérer ou protéger. Dans ces systèmes réels, l'hydrogéologue de terrain poursuit un but précis et déploie pour y parvenir une certaine activité appelée prospection.

Nous introduisons ici les notions de **schéma** et de **modèle** parce qu'elles sont commodes pour décrire la prospection réelle et parce qu'elles sont le fondement de la prospection simulée.

Notions de schéma et de modèle

Soit un hydrogéologue, mandaté pour étudier une vaste région. Les observations ponctuelles sur le terrain le renseignent quant au but poursuivi, mais il constate que ces informations ne prennent pas corps et sont inexploitables tant qu'elles ne figurent pas simultanément sur une entité représentative de toute la région: Il a besoin de dessiner une carte, de faire des coupes et des croquis, tous moyens permettant de ramener ce qui l'intéresse à l'échelle de ce qu'il peut percevoir simultanément.

Définition: Carte, coupes et croquis constituent un schéma du système réel.

Ne retenons que la carte. L'hydrogéologue a établi une correspondance schématique entre la région d'étude et la carte:

- en représentant certains éléments du système réel par des symboles appropriés;
  Nature des roches affleurantes
  et perméabilités estimées. --> Figurés de couleur
  Cours d'eau. --> Traits continus
  etc.

- en précisant certaines relations de la réalité; par exemple, en adoptant une loi physique décrivant convenablement la circulation de l'eau dans le système réel.

Empruntons à [SUTER, 1966] les propriétés du schéma:

Un schéma est établi dans une intention préalable.
Dans cet exemple, supposons que l'intention préalable (ou but) soit d'alimenter une collectivité en eau potable.

Un schéma est sommaire.
Seuls certains éléments du système réel sont symbolisés et seuls certains aspects de ces éléments ou des relations entre ces éléments sont caractérisés par les symboles et les relations introduits dans le schéma. L'hydrogéologue portera dans le schéma la perméabilité associée à une roche davantage que sa composition minéralogique. Il portera probablement une loi décrivant la circulation des eaux souterraine.

Un schéma est toujours perfectible, sans jamais pouvoir être identifié au système réel.

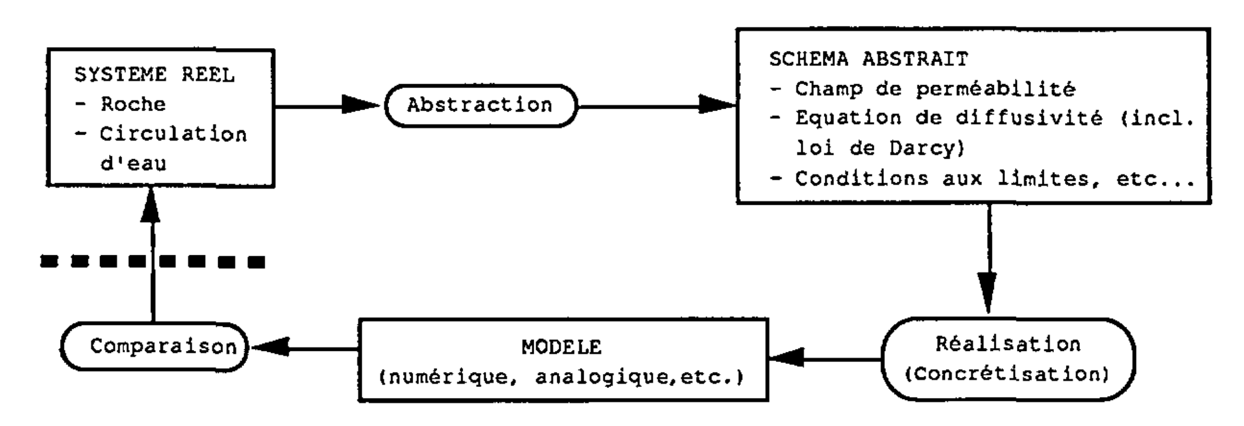
Une fois construit, le schéma est efficace dans la perspective de l'intention préalable initiale.
Le schéma doit être capable de répondre à la question: Où trouver la quantité d'eau potable demandée ?

Le schéma acquière une certaine autonomie par rapport au système réel.
Cette autonomie est telle qu'il est même possible, oubliant le système réel premier, d'imaginer un système réel tout différent.

Définition: On appelle modèle d'un schéma toute concrétisation dont le schéma est la représentation symbolique.

Le système réel ayant motivé l'établissement du schéma en est un modèle, mais on peut envisager de nombreux autres modèles d'un schéma donné.

Figure 1.1: Relations entre système réel, schéma (abstrait) et modèle. Illustration pour un usage fréquent en hydrogéologie.
D'après L.Kiraly (Cours)



Le cycle de construction d'un modèle est toujours interrompu après l'étape de comparaison. A ce moment, on considère que le modèle peut remplacer le système réel sous l'aspect du but poursuivi et donc que les enseignements tirés du modèle sont transposables au système réel.

Chapitre deuxième

Construction d'un système de simulation

On indique ici les caractéristiques générales d'un système de simulation de prospection hydrogéologique tendant à donner une expérience à celui qui l'utilise. Il s'agit du contenu conceptuel minimum d'un tel système, sans considération du formalisme adopté par la suite. Toutefois, dès ce stade, des choix doivent être faits; nous les énonçons et les justifions.

2.1 Principe

La prospection hydrogéologique simulée demande à l'hydrogéologue de travailler sur un modèle au lieu d'un système réel.

Sur cette base, le processus est identique à la prospection d'un système réel: Libre au prospecteur d'établir un schéma et d'en construire un modèle.

Du point de vue de l'acquisition d'expérience, les avantages de la prospection simulée sont les suivants, si le support du système est bien choisi:
- Coût très nettement inférieur à celui de la prospection d'un système réel.
- Rapidité. La plupart des tâches sont exécutées immédiatement, ce qui permet de comprimer sensiblement le laps de temps généralement nécessaire aux investigations.
- Non conséquence des erreurs commises par l'hydrogéologue, sur l'économie et sur les milieux naturels.

• Option: L'ordinateur répond aux exigences formulées ci-dessus. Nous choisissons d'y construire le système, alors appelé aussi **logiciel**.

2.2 Personnel nécessaire

2 personnes au moins sont nécessaires au fonctionnement d'un système de simulation:

- Un **prospecteur**, appelé aussi **utilisateur**, **élève** ou **participant**. C'est à lui que s'adresse le système et c'est pour lui qu'il est conçu.

- Un **opérateur**, dont la tâche est de fabriquer le modèle, d'imposer un but à l'utilisateur et de donner à ce dernier les moyens d'y parvenir. L'opérateur, à la différence des autres hydrogéologues, ne construit pas un modèle pour résoudre un problème, mais pour en poser un à ses collègues. Nous jouons le rôle de l'opérateur.

• Option: Une fois son travail accompli, l'opérateur ne doit plus être nécessaire au fonctionnement du système. Celui-ci est conçu de manière à ce que, du point de vue de l'utilisateur, le système remplace parfaitement l'opérateur. Autrement dit, nous choisissons de faire en sorte que, l'opérateur ayant joué son rôle à priori, seul le prospecteur soit nécessaire au fonctionnement du logiciel. L'avantage en économie de personnel est évident.

2.3 Contenu du système de simulation

Le contenu minimum est: un but + un modèle.

• Option: Dans le cas présent, décidons que le logiciel contient:
- 1 but, fixé par l'opérateur, imposé à l'utilisateur.
- 1 domaine réaliste, noté D3, conçu par l'opérateur, dans lequel l'utilisateur doit atteindre le but. Le domaine réaliste est constitué de **champs** de **paramètres**.
- des **outils** applicables au domaine réaliste, permettant à l'utilisateur d'arriver au but. Les outils sont conçus par l'opérateur et sont en nombre fini.

Explicitons ce qu'est le modèle par rapport à l'énoncé des constituants du système, en remarquant que d'une manière générale, les modèles réalisés sur ordinateur n'existent que pendant la durée de fonctionnement du programme qui les génère et qu'on contourne cette difficulté en demandant au programme de laisser une trace, généralement sous forme d'un fichier de résultat.

- Dans notre cas, le modèle n'existe que pendant l'application d'un outil sur le domaine réaliste.
- L'utilisation d'un outil par le prospecteur provoque la réalisation du modèle, qui utilise tout ou partie des informations contenues dans le domaine réaliste.
- Le domaine réaliste n'est pas le modèle.
- La trace laissée à l'utilisateur par le modèle est le résultat (fichier ou information à l'écran) de l'application de l'outil.
- A l'état de repos (non fonctionnement), le logiciel ne fait que stocker un schéma abstrait. Ce dernier est concrétisé en modèle à la demande de l'utilisateur (fonctionnement).

On conçoit alors que chaque outil, selon sa nature, génère un seul aspect de ce que nous avons jusqu'à présent appelé "le modèle". Autrement dit, étant donné la diversité des outils que l'opérateur souhaite mettre à la disposition de l'élève, ce que nous avons désigné par "modèle" est un assemblage de modèles distincts: Il y aura certainement un modèle hydrodynamique, probablement un modèle de transport de matière, un modèle de circulation du courant électrique, un modèle sismique, gravifique, géologique, climatique, topographique, etc.

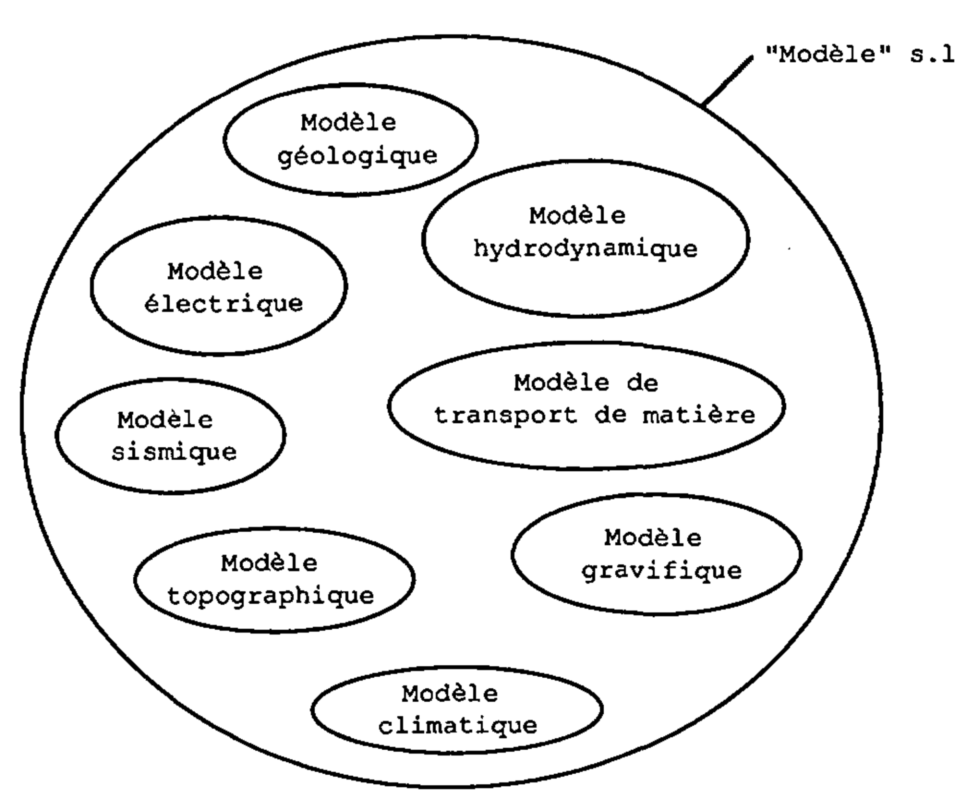


Figure 2.1 Quelques types de modèles dont la présence est souhaitée dans un système de prospection hydrogéologique simulée.

Nous en concluons que le logiciel génère autant de types de modèles qu'il y a d'outils à disposition.

Le domaine réaliste est le tronc-commun à tous les modèles, dont chacun d'eux fait un usage spécifique; nous distinguons 2 types de modèles:
- Modèles nécessitant un calcul; dans ce cas le schéma abstrait dont est issu ce modèle comporte des **lois physiques** (ev. des conditions aux limites). Le calcul attribue des valeurs aux **variables** (e.g potentiel hydraulique, résistivité électrique apparente,etc).

- Modèles ne faisant pas intervenir de calcul; Aucune variable n'est produite. Le programme lit un paramètre du domaine réaliste et le communique à l'utilisateur. Dans ce cas particulier, le modèle vaut le domaine réaliste (en général, seulement une partie de D3 et une partie des paramètres). De tels modèles sont appelés **observations** (e.g la carte géologique est un modèle qui relève la valeur exacte du champ Nature pétrographique & Faciès en tout point de la face supérieure de D3).

2.4 Modularité

L'énoncé du contenu du système de simulation laisse entrevoir l' interchangeabilité des éléments qui le composent:

- L'opérateur impose le but qu'il veut et peut en changer.
- Il peut remplacer un domaine réaliste par un autre, en s'inspirant d'un milieu saturé ou pas, à porosité d'interstice, fracturé ou karstifié, sous un climat aride, tempéré, tropical, etc.

- Le nombre et la qualité des outils sont modifiables; le logiciel peut produire toutes sortes de modèles.

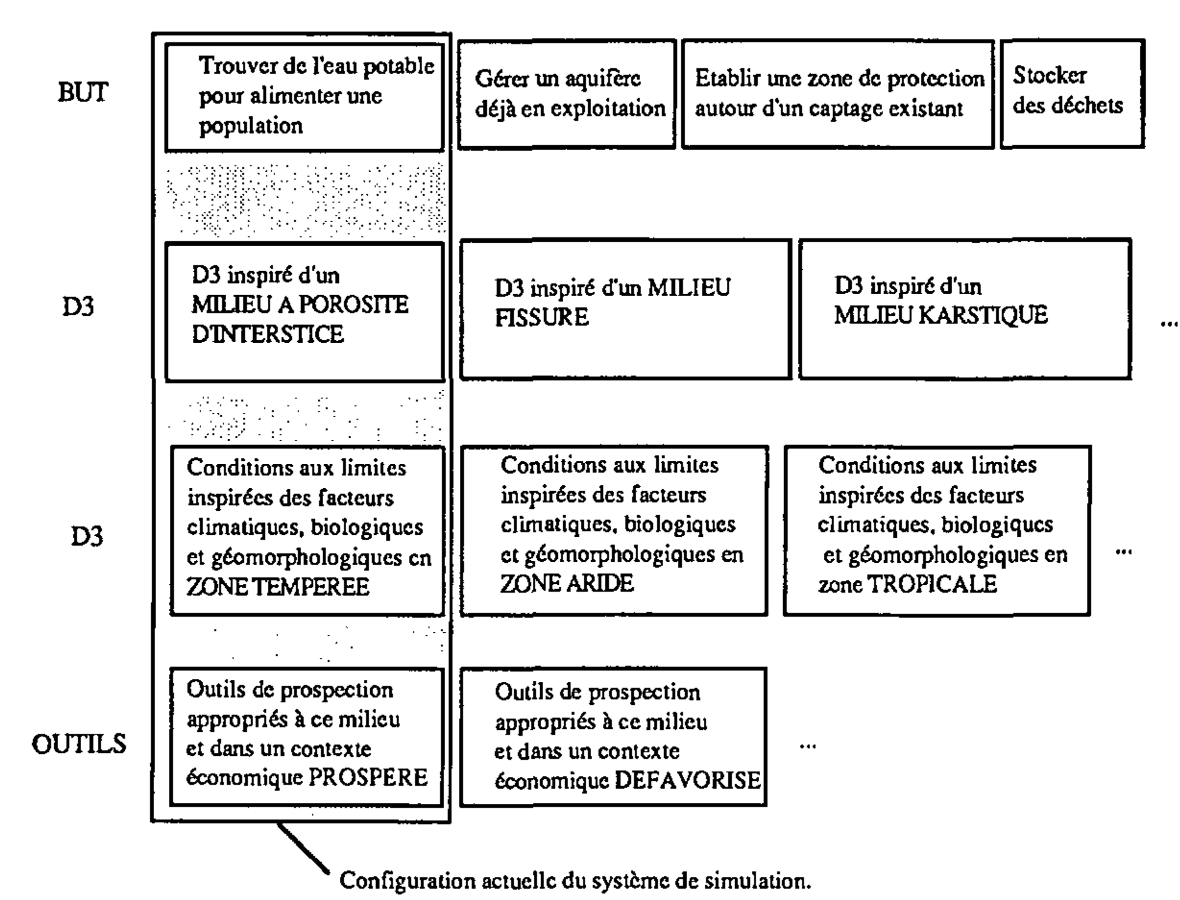


Figure 2.2 Aperçu de quelques combinaisons possibles de buts, de domaines réalistes et de conditions budgétaires (représentatives des outils).

Le système peut représenter toutes les combinaisons possibles de buts, de modèles et de conditions budgétaires (représentatives des outils), bien que certaines soient peu vraisemblables. Parmi elles, nous en avons choisi une, appelée **configuration**.

Cette modularité est réelle, mais en pratique, il existe des liens entre les éléments du logiciel, qui sont autant de contraintes pour l'opérateur:

- Le but étant imposé à l'utilisateur, l'opérateur doit introduire dans le domaine réaliste les constituants nécessaires et utilisables par les modèles en vue d'atteindre ce but. En introduire davantage est coûteux pour l'opérateur et inutile pour l'utilisateur. Suggérons quelques paramètres devant généralement figurer dans D3, et d'autres, généralement inutiles:

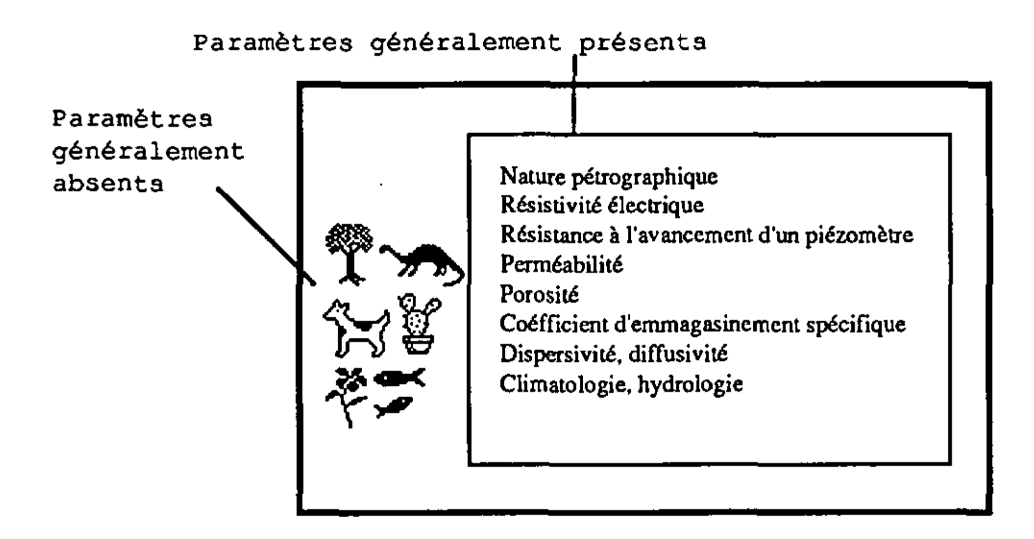


Figure 2.3 Aperçu de quelques paramètres pouvant figurer dans le domaine réaliste (non exhaustif).

- L'opérateur n'introduit dans D3 que les paramètres utilisables par l'élève, cette fois sous l'aspect financier. Un certain nombre de paramètres constitutifs du domaine réaliste ne doivent y figurer que si le système de simulation donne au prospecteur les moyens d'en faire usage. Par exemple, la densité des roches figurera seulement si le gravimètre fait partie de la panoplie de l'hydrogéologue dans le contexte économique que l'on veut représenter.

- La liste des outils de prospection dépend également de D3 dans la mesure où ne figureront que ceux capables d'utiliser les paramètres existant.

- On peut ajouter ou modifier un outil sans modifier D3 si le(s) paramètre(s) nécessaires au fonctionnement de cet outil y figurent déjà. Dans le cas contraire, on ajoute le(s) champ(s) de paramètre(s) nécessaire(s).

- Le but du prospecteur peut être modifié sans conséquence sur le reste du système à condition que les outils nécessaires soient disponibles, et donc que les paramètres indispensables à leur application figurent dans D3.

Définition: **SPHINX** est un logiciel acceptant le dépôt d'un but, d'un domaine réaliste et d'outils dans l'ordinateur. C'est un formalisme d'assemblage, vide de contenu tant que l'opérateur n'y dépose pas au moins une configuration, mais qui peut en recevoir un grand nombre.

• Option: La limite entre ce qui est spécifique d'une configuration et ce qui relève du logiciel n'est pas aisée à indiquer car on peut tout changer, ajouter, enlever. Pour fixer une telle limite, nous ferons en sorte qu'il soit particulièrement facile de changer de domaine réaliste.

2.5 Faut-il "faire vrai" ?

Le "matériel" sur lequel travaille l'élève est un assemblage de modèles, c'est à dire en général une simplification considérable du système réel dont s'est inspiré l'opérateur. Cela dépend de la nature de ces modèles. Les approximations concernent principalement:

L'allure des champs de paramètres constituant D3,
Le nombre de ces champs,
Les lois physiques permettant d'assigner une valeur à une variable.

Ces aspects conditionnent le réalisme des modèles produits. Pour augmenter ce réalisme, l'opérateur peut tricher:

A - En déformant les résultats fournis par les modèles (e.g l'utilisation de nombres aléatoires modifiant la lecture des résistivités vraies permet d'augmenter en apparence l'hétérogénéité de ce champ lors d'un sondage électrique). Ce type d'artifice permet de gommer un peu de la grossièreté du domaine réaliste.
Ce n'est pas forcément un gain en réalisme. Il est préférable de dire à l'utilisateur: "Le domaine réaliste est simple", "les modèles produits admettent telles hypothèses (...), font appel à des lois physiques qui sont les suivantes (...) et qui sont toujours valables."
Ainsi l'opérateur préserve le seul point commun des modèles et du système réel: Ils font foi pour le prospecteur en présentant une cohérence dans leurs comportements respectifs.

B - En demandant aux modèles de produire des variables qu'ils ne sont pas faits pour produire. Prenons l'exemple du niveau d'eau dans l'aquifère. Si l'équation utilisée décrit la circulation d'eau dans une nappe captive (cas général) et qu'on veut représenter le comportement d'une nappe libre (cas fréquent), deux approches sont possibles pour l'opérateur:

- Donner la valeur du potentiel hydraulique calculé au sommet du domaine et l'appeler "**niveau de la nappe**".
- Communiquer la même valeur, en indiquant à l'utilisateur de quoi il s'agit exactement ("Il existe partout un potentiel hydraulique dans le domaine, vérifiant l'équation (...)"."Dans le logiciel, on appele niveau de la nappe le potentiel hydraulique calculé au sommet du domaine").

Cette dernière approche nous parait meilleure:

- En confrontant l'élève aux contradictions apparentes, inhérentes au type de modèle utilisé ($h(x,y,1000) = 990$ m, alors qu'il n'y a probablement pas de zone saturée dans le système réel au point $(x,y,1000)$).
- Dans le cas précis, nous espérons le sensibiliser à la représentativité de la mesure du niveau d'eau dans un sondage vis-à-vis de ce que sont les valeurs ponctuelles de potentiel hydraulique au voisinage de l'ouvrage. Ce point, important, est illustré par l'**annexe 1**.

Notre position est critiquable. En ne dissimulant pas les spécificités et les limites de la prospection par une collection de modèles, le logiciel donne, dans le cas extrême, une expérience de prospection simulée et pas une expérience de prospection des systèmes réels. Cela est en apparence contraire au but de notre travail. De cette objection, nous faisons toutefois un avantage, en énonçant, conformément à la description de l'activité de l'hydrogéologue donnée au § 1.4, que la modélisation,

quelqu'en soit la finesse et la complexité, est une étape incontournable de la prospection, réelle ou simulée. De ce fait, il relève du logiciel d'opposer l'élève aux restrictions du modèle, auxquelles il sera de toute manière confronté, la seule différence par rapport à l'investigation d'un système réel étant de faire apparaître ces problèmes dès le stade de la manipulation (application d'outil).

• Option: Il faut communiquer à l'utilisateur les restrictions liées aux modèles, lorsque ces restrictions distinguent sensiblement ces modèles du comportement des systèmes réels. Sans chercher à tout prix à "faire vrai", l'opérateur n'hésitera pas à donner des définitions, spécifiques au logiciel, d'outils ou d'aspects dont il n'emprunte que le nom (e.g "niveau de la nappe").

Ces remarques permettent de définir la vocation du système de simulation:

Le logiciel doit donner à l'utilisateur une "matière première", afin que celui-ci puisse construire un modèle qui lui est propre et qui ressemble à celui qu'il construirait à partir du système réel dont s'est inspiré l'opérateur. Cela ne signifie pas que les modèles produits par le logiciel doivent être comparables, dans leur nature, au comportement du système réel. Ils doivent être comparables seulement quant à l'usage que peut en faire l'utilisateur, c'est à dire un modèle hydrogéologique.

Nous nous attachons maintenant à décrire SPHINX, au travers de la configuration choisie.

Chapitre III

Un exemple de configuration: Prospection d'eau en milieu à porosité d'interstice.

3.1 Choix de la configuration

Nous avons donné, à titre d'exemple, un but et des modèles représentatifs de l'activité des hydrogéologues et des milieux naturels dans notre région. Les modèles donnent une image du comportement d'un synclinal jurassien dont le remplissage par des sédiments quaternaire constitue un aquifère exploitable [Claudon, 1977] . Le fait de choisir un milieu à porosité d'interstice n'est pas tout à fait innocent: les modèles numériques hydrauliques [Kiraly, 1992] utilisés sont particulièrement adaptés à représenter ce type de milieu.

Le but imposé aux utilisateurs, "trouver de l'eau", est l'occasion de développer un certain nombre de modèles soulevant des problèmes qui nous ont paru intéressants. Les moyens financiers alloués à l'utilisateur pour parvenir à ce but lui permettent d'utiliser les outils que nous avons eu le temps de concevoir dans le temps imparti à la réalisation du logiciel.

Suggestion: A l'heure actuelle, le logiciel comprend un but et un domaine réaliste, facilement interchangeables mais uniques, communs à tous les utilisateurs. Une amélioration consisterait à en stocker plusieurs, parmi lesquels le prospecteur ferait un choix initial. Il y aurait ainsi plusieurs configurations disponibles. Nous avons fait en sorte que cette modification ne demande pas un gros effort.

3.2 Domaine réaliste

Le domaine réaliste constitue la source d'information nécessaire à la construction des modèles; sa description est prioritaire. Afin de ne pas surcharger l'exposé, nous donnons dans ce qui suit une illustration simplifiée de ce qu'est D3 dans le logiciel.

Il est limité spatialement:

- En (x,y): Par des conditions de proximité du lieu consommation (coût des adductions) et des conditions administratives (i.e frontières communales).
- En (z): Par des conditions de prix de l'ouvrage de captage (construction et exploitation) ainsi que par le prix des investigations antérieures nécessaires à la recherche de ressources en profondeur.

Il est constitué par des champs tridimensionnels de paramètres.

Un champ existe pour chacun des paramètres suivants:
- Nature pétrographique & faciès
- Age des roches
- Résistivité électrique vraie (Rho_V)
- Résistance à l'avancement d'un piézomètre installé par battage (FR)
- Perméabilité anisotrope ([K])
- Porosité efficace volumique (m_e)
- Coefficient d'emmagasinement spécifique (S_S)
- Débit distribué (Q_D)

A chaque point (x,y,z) de D3 correspond une valeur pour chaque paramètre. Si un point n'est pas défini par tous les paramètres, alors il ne fait pas partie de D3.
La forme des champs de paramètres ne varie pas dans le temps, les valeurs associées non plus.

Certains modèles consistent en la résolution d'équations différentielles en tout point de D3. On utilisera la méthode des éléments finis de Galerkine, option déterminante pour la construction du domaine réaliste, qui est discrétisé en éléments finis quadratiques à 1, 2 ou 3 dimensions dans un espace tridimensionnel.

Les champs de tous les paramètres de D3 relèvent de cette géométrie. Ainsi, la valeur d'un paramètre, qu'il s'agisse d'une grandeur scalaire, tensorielle, vectorielle ou purement descriptive, est constante à l'intérieur d'un élément.
Remarquons qu'il s'agit là d'une commodité, destinée à alléger le maniement et le remplacement éventuel du domaine réaliste. On pourrait introduire d'une autre manière les champs de paramètres n'intervenant pas dans les modèles à éléments finis.

D3 est un ensemble d'éléments finis quadratiques 1, 2 ou 3D. Cet ensemble est partitionné par une relation d'equivalence dans le champ du paramètre Age des roches. On définit ensuite pour chaque classe une relation injective entre la valeur du champ Age et celle de tous les autres paramètres, à l'exception du Débit distribué.
Pour ce dernier, on définit une seconde relation d'equivalence. La valeur de ce champ est en général 0, à l'exception des éléments de la surface de D3 (D2).

Remarque: La valeur associée à chaque classe dans le champ Age n'est pas exploitée par le logiciel, qui n'a besoin que d'une propriété de ce champ (cf § 3.2.4). L'Age des roches ne figure donc pas explicitement dans le système.

En pratique, la valeur de tous les paramètres associés à un élément quelconque est donnée par le numéro de la classe d'équivalence pour les 2 relations définies.

Dans l'exemple choisi, le nombre de classes d'équivalence vaut 4 pour les 2 relations. Ce nombre est aisément modifiable pour une autre configuration.

Concernant le champ des perméabilités, une limitation liée à la discrétisation par éléments finis apparait: Etant donné la relative grossiéreté de ce "découpage", il n'est pas raisonnable de vouloir respecter une distribution des valeurs selon une loi lognormale [ROUSSELOT, 1976].

3.2.1 Géométrie du domaine

L'assemblage d'éléments finis quadratiques constituant le domaine réaliste obéit à des régles de construction. Ces règles doivent impérativement être respectées pour garantir le bon fonctionnement du logiciel.

Il n'y a que des éléments quadratiques, sans noeuds au milieu des faces ou des volumes. Les types admis sont les suivants (formes données dans l'espace local):

Segment	(3 noeuds)
Triangle	(6 ")
Rectangle	(8 ")
Prisme triangulaire	(15 ")
Cube	(20 ")

Deux noeuds appartenant à un méme élément ne peuvent étre confondus; il n'y a pas d'éléments pincés.

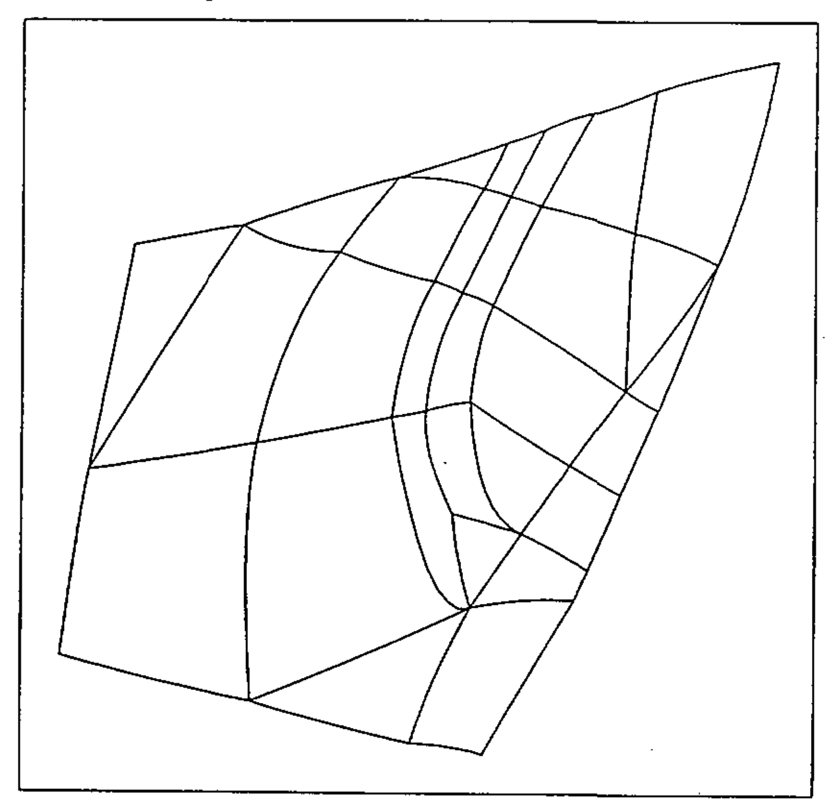


Figure 3.1 Discrétisation du domaine réaliste. Vue bidimensionnelle en plan.

La forme des éléments tridimensionnels, projetée sur le plan (x,y) est quelconque tant que le déterminant de la matrice jacobienne n'est pas nul. Par définition, les arètes des éléments ne se croisent pas ailleurs qu'aux noeuds des coins (noeuds majeurs). Les coins des éléments ne présentent pas d'angles très petits ou très grands (≥ 180°).

La forme des éléments, projetée sur un plan quelconque incluant l'axe z, est un segment de droite vertical ou un parallépipède à bords verticaux.

La projection de tous les noeuds et de tous les éléments du réseau sur (x,y) donne une image identique à celle des seuls noeuds et éléments de la "surface" (D2).

Une couche d'éléments bidimensionnels couvre la face supérieure (D2) de D3. La valeur de tous les paramètres dans ces éléments est égale à celle des éléments situés juste en dessous, à l'exception du Débit distribué. On peut ainsi représenter une précipitation par unité de surface, rechargeant le domaine réaliste.

Il n'y pas de trou à l'intérieur du domaine réaliste si ce trou ne l'affecte pas dans toute son épaisseur.

D3 est assez "épais", de sorte que l'imposition d'un débit raisonnable en n'importe quel nœud provoque un chute de potentiel faible, comparée à l'épaisseur du modèle.

L'extension de D3 selon (x,y) est suffisante pour que les conditions de potentiel ou de débit imposées aux limites conservent leur vraisemblance sous l'action d'un débit imposé par l'utilisateur dans un rayon raisonnable autour du lieu prévu de consommation.

3.2.2 Relations entre paramètres

Il existe dans D3 des relations entre les champs des divers paramètres. Elles indiquent les liens entre paramètres dont a tenu compte l'opérateur en concevant le domaine réaliste. Pour le prospecteur, il s'agit de retrouver et d'exploiter de telles relations, toujours dans le sens de la détermination des paramètres hydrogéologiques, qui seuls l'intéressent:

Ex: Résistivité électrique vraie faible --> Sédiments fins --> K faible

2 approches permettent au prospecteur de connaître ces relations:

- Détermination expérimentale.
  Un sondage électrique + un forage carotté au même endroit.
  En employant le perméamètre sur divers segments de la carotte, on peut établir une corrélation précise Rho_v/K.
- Emploi de relations empiriques.
  L'élève utilise des relations préétablies, généralement vraies. Nous qualifierons de <u>réaliste</u> une relation admise dans une grande partie des schémas abstraits disponibles dans la littérature concernant le type de système réel représenté.
  Ex: Sondage électrique seul. Rho_v faible --> K probablement faible.

Lors d'une prospection, les relations empiriques sont largement utilisées, "à défaut de mieux". Aussi, la qualité de l'exercice de simulation (i.e son apport à l'expérience du participant) est largement conditionnée par le réalisme des relations entre paramètres.
La figure 3.2 illustre la nature des relations existant dans D3; les valeurs associées à chaque classe d'équivalence sont données à la figure 3.3.

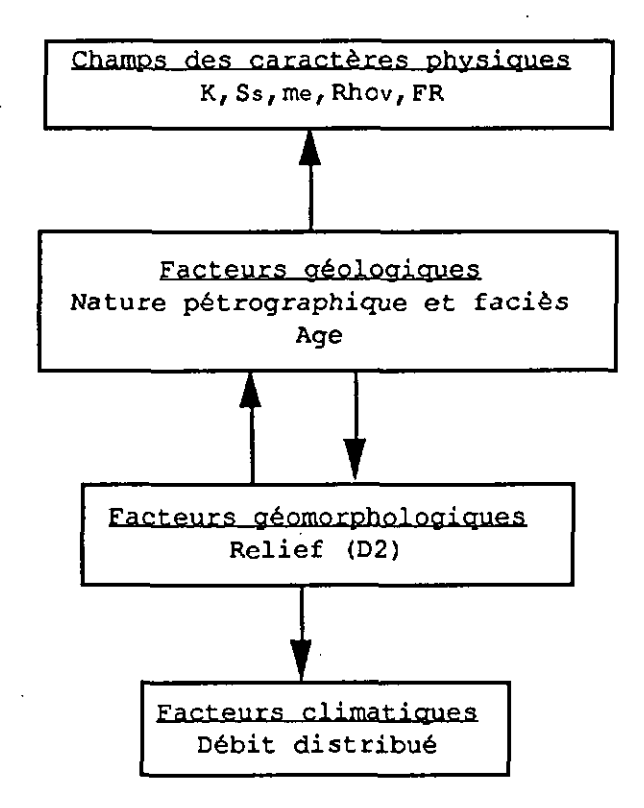


Figure 3.2: Nature des relations les plus importantes entre les champs des divers paramètres du domaine réaliste.

Classe	Nature pétrographique et Faciès	Rho_v [Ω.m]	FR [coups/m]
1	Graviers (fluvioglaciaire)	250.	100.
2	Argiles lacustres	40.	70.
3	Moraine recente (Wurm)	80.	500.
4	Calcaires marneux (Cretace)	600.	1000.

Classe	Kxx [m/s]	Kyy[m/s]	Kzz[m/s]	m_e [1]	S_s [1/m]
1	5.0D-03	5.0D-03	5.0D-03	0.15	0.05
2	1.0D-06	1.0D-06	1.0D-06	0.10	0.01
3	1.0D-04	1.0D-04	1.0D-04	0.15	0.01
4	1.0D-07	1.0D-07	1.0D-07	0.10	0.02

Figure 3.3: Valeur des paramètres associés à chaque classe d'équivalence.

Dans la configuration choisie, les champs Age et Nature petrographique & faciès possèdent des propriétés qui seront utilisées par la partie du logiciel exerçant un contrôle sur le déroulement de la prospection. Nous les indiquons maintenant.

3.2.3 Propriétés du champ Nature pétrographique et faciès

a - Le champ des faciès est un empilement selon z de niveaux (couches d'éléments appartenant à la même classe d'équivalence) d'épaisseur variable (parfois nulle). Chaque niveau n'apparait qu'une fois au droit de tout point (x,y) de surface:

- Ces niveaux ne se chevauchent pas
- Ils présentent des plis qui ne vont pas jusqu'au renversement

b - Le champ des faciès peut être décrit entièrement par la transformation géométrique, au droit de tout (x,y) de D2, d'une **"colonne stratigraphique théorique maximale"** (CSTM).

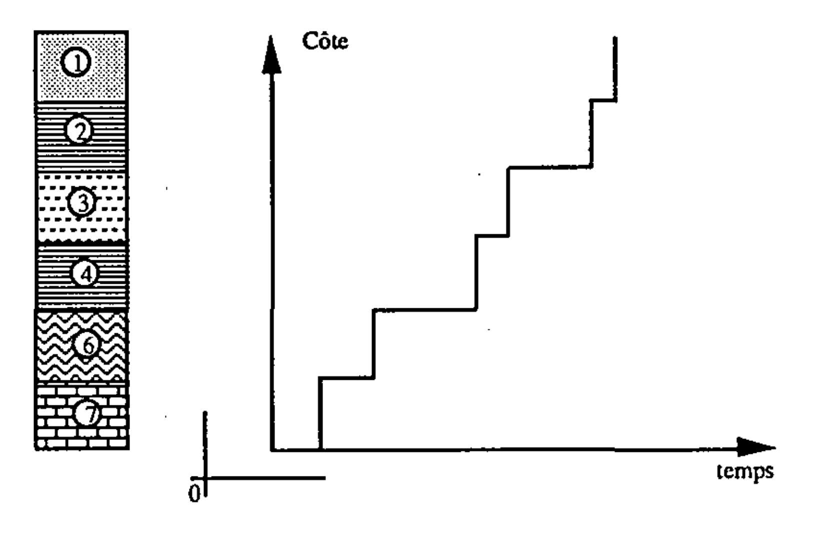
Remarques: - Le terme "colonne stratigraphique théorique maximale" fait allusion à la terminologie du système réel.On l'utilise parce qu'il illustre avec précision ce qui est le "vecteur des épaisseurs moyennes des niveaux constituant le champ Nature pétrographique et faciès".
- La CSTM permet de quantifier sur D2 le champ tridimensionnel Nature pétrographique et faciès. Mentionnons dés à présent que la connaissance qu'a le prospecteur de ce champ devient également une quantité définie sur tout D2.
- Elle comporte tous les niveaux connus ou inconnus susceptibles d'être rencontrés au moins à un (x,y,z) de D3.

- Les variations latérales de faciès sont décrites en introduisant des niveaux différents.

3.2.4 Propriété du champ âge

Au droit de tout (x,y) de D2, la côte z des points de D3 est une fonction croissante du temps.

On conclue que le paramètre âge a une valeur plus grande pour un niveau donné que pour les niveaux situés au dessus de lui:



Les règles suivantes sont alors applicables:
- Si un faciès apparait 2 fois dans la colonne stratigraphique, il correspond à 2 niveaux différents (i.e 2 et 4); la relation Age / Faciès est une injection (à un âge donné correspond un seul faciès).
- Si le niveau n n'est pas rencontré entre n-1 et n+1, alors n n'existe pas sous (x,y) et ne peut être trouvé dans la colonne (i.e 5).
- Sous n, il ne peut y avoir que n+1, n+2, etc.

3.3 Modèles

Nous énonçons ici la façon dont le logiciel produit des modèles. Ce sont les outils de prospection, examinés sous l'aspect de leur fonctionnement et non sous celui de l'usage qu'en fait l'élève (lieu où il les applique, ordre dans lequel il les emploie, utilisation qu'il a des résultats obtenus, etc).

3.3.1 Carte topographique

La construction des lignes de niveau par le logiciel utilise les mêmes fonctions d'interpolation que celles qui définissent la forme des éléments finis. C'est donc une reproduction exacte de la surface du domaine réaliste qui, en l'occurrence, vaut le modèle. La carte topographique est une observation de D3, caractérisée par le fait de donner la valeur de z partout en D2 (pas d'observation ponctuelle).

Faisant partie des données de base du problème à résoudre, la carte topographique est disponible à tout moment, par affichage à l'écran, avec option d'impression. Son utilisation est non facturée et non inscrite dans l'historique des manipulations. L'utilisateur peut outrepasser la proposition du programme quant au choix de la valeur minimale à représenter. Il choisit l'équidistance.

• Option: Il aurait été possible d'utiliser un programme déjà existant, disponible dans le commerce, offrant de nombreuses facilités. Les techniques d'interpolation utilisées dans ce genre de programmes (e.g moindres carrés) ne permettent en général pas de rendre compte avec précision de la géométrie du domaine réaliste, définie par des fonctions d'interpolation quadratiques pour chaque élément.

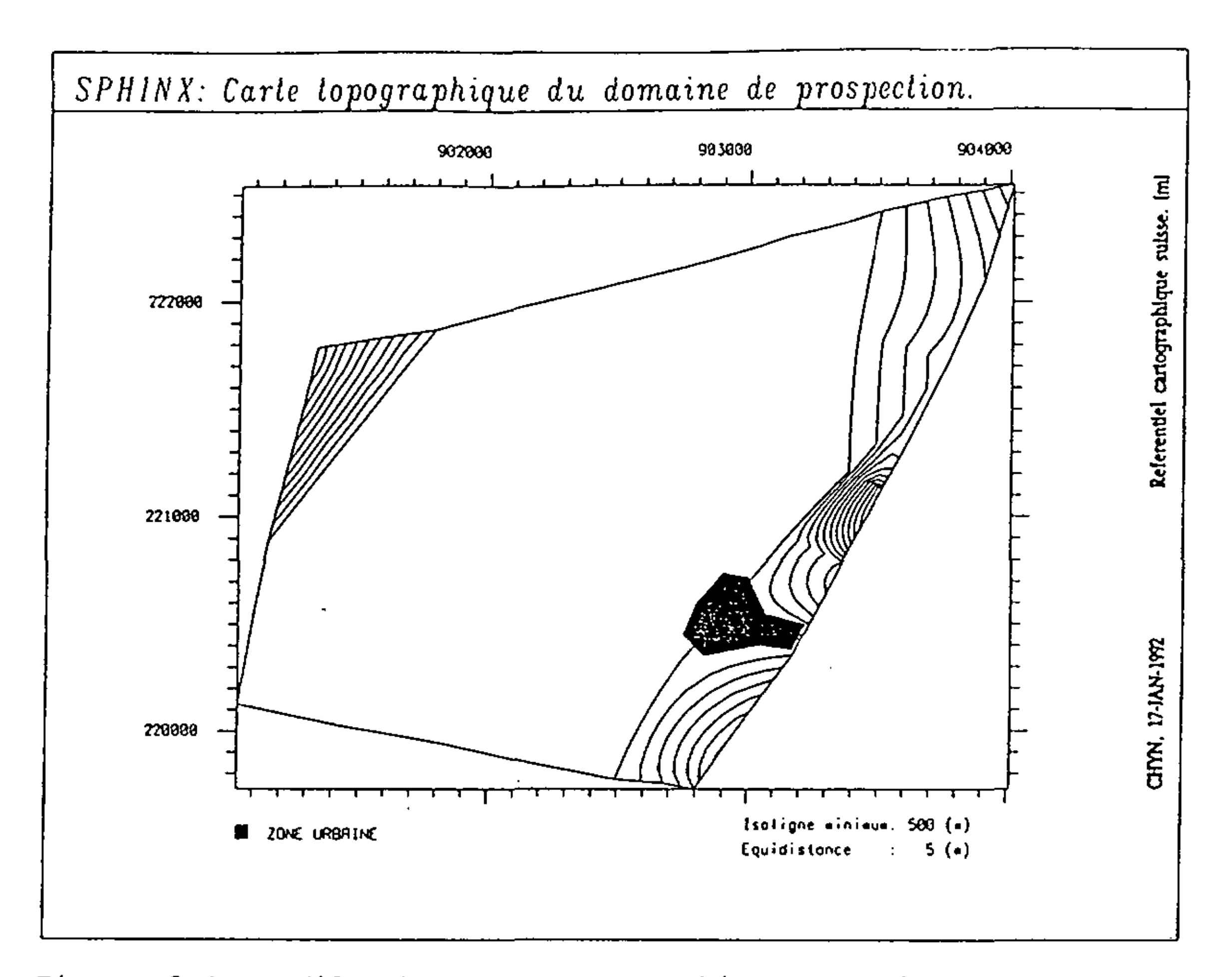


Figure 3.4: Modèle de carte topographique produit par SPHINX. Le référentiel géographique est celui de la Suisse. Il pourrait être quelconque; en cas de modification, seule la mention du référentiel est à changer. La zone urbaine représente une source possible de pollution.

3.3.2 Carte géologique

Cet outil donne la valeur du champ Nature pétrographique & faciès simultanément en tout point de D2; les limites entre formations correspondent toujours à des limites entre éléments finis. Il s'agit, comme pour la carte topographique, d'une observation de D3. La légende accompagnant la carte ne mentionne que les classes d'equivalence rencontrées sur D2.

Utilisation non facturée, non inscrite dans l'historique des manipulations. Fait partie des données de base du problème à résoudre; disponible à tout moment, par affichage à l'écran, avec option d'impression.

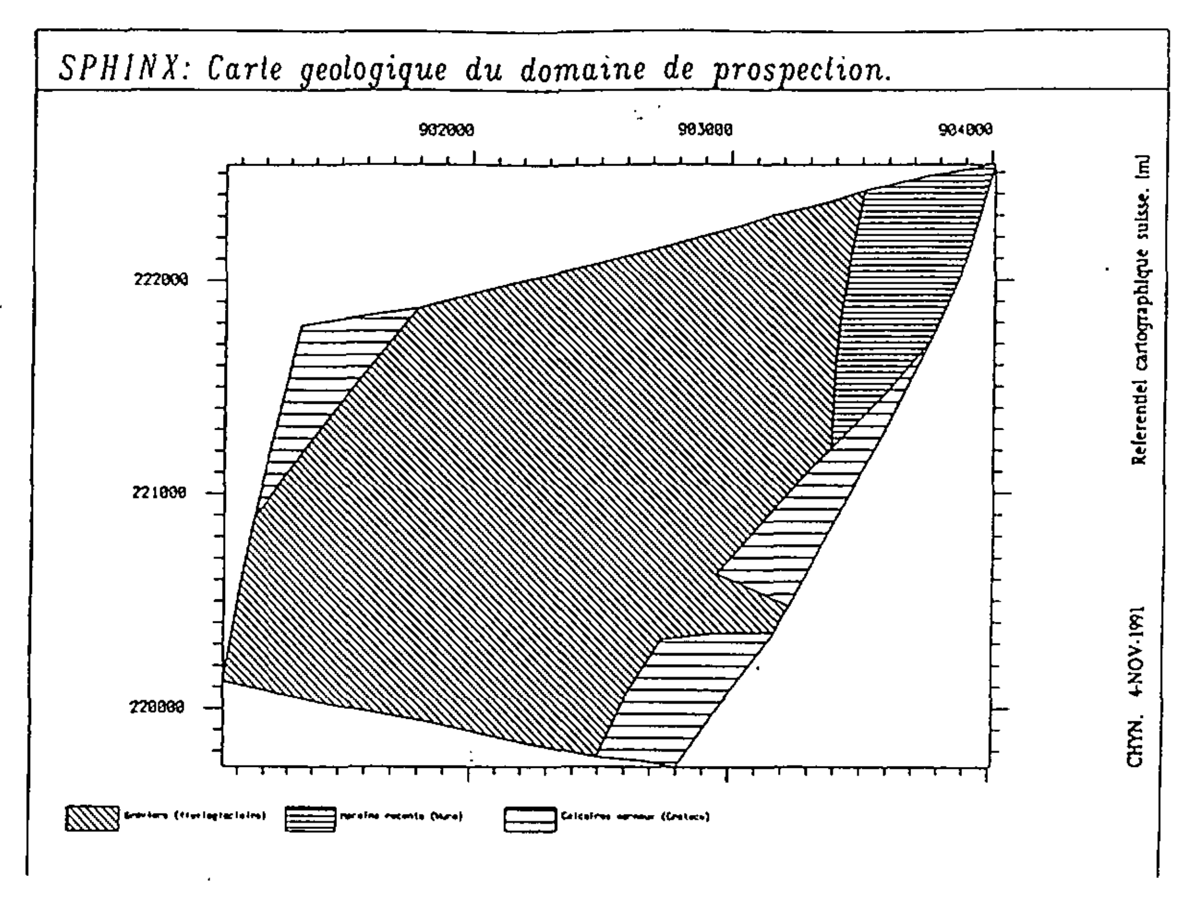


Figure 3.5: Modèle de carte géologique produit par SPHINX.

3.3.3 ETP

L'évapotranspiration est implicitement prise en compte dans le champ Débit distribué. Les modèles fournis ici sont destinés à aider l'utilisateur à estimer la valeur de ce champ, mais n'interviennent pas directement dans la construction du domaine réaliste par l'opérateur.
Les modèles d'évapotrantranspiration potentielle sont au nombre de 2, donnés par les formules de Thornthwaite et de Turc. Les programmes correspondant incluent la tabulation des coefficients nécessaires [Brochet et Gerbier,1968].

Pour la formule de Thornthwaite, on applique:

$$ETP = 16. * \left[\frac{10 * T}{I}\right]^{a} * F(1)$$

ETP = Evapotranspiration potentielle [mm]
T = Température moyenne sous abri à la période considérée [°C]
a = $6.75E-07 * I^3 - 7.71E-05 * I^2 + 1.79E-02 * I + 0.49239$
I = Indice thermique annuel, somme des 12 indices mensuels i

$$i = \left[\frac{T}{5}\right]^{1.514}$$

F(1) = Coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois

Pour la formule de Turc:

$$\text{Si } U_m > 50\%,\ \text{ETP [mm/10 jours]} = 0.13 * \left[\frac{T}{T+15}\right] * (Rg + 50)$$

$$\text{Si } U_m < 50\%,\ \text{ETP [mm/10 jours]} = 0.13 * \left[\frac{T}{T+15}\right] * (Rg + 50) * \left[1. + \frac{50 - U_m}{70.}\right]$$

Um = Humidité relative moyenne
T = Température moyenne sous abri à la période considérée [°C]
Rg = Radiation solaire globale = Iga * (0.18 + 0.62(Hr/Hm))
Hr = Durée réelle d'insolation
Hm = Durée astronomique du jour
Iga = Radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère

Le participant utilise les données climatiques fournies par la bibliographie inclue dans le logiciel. Les données pluviométriques sont en rapport étroit avec les valeurs du champ Débit distribué sur D2, mais sont stockées indépendamment.

Utilisation non facturée, non inscrite dans l'historique des manipulations.

3.3.4 Sondages électriques

Le modèle est produit par une solution analytique basée sur la méthode des filtres de Ghosh. Cette méthode est exposée en détail dans de nombreux ouvrages [Ghosh, 1971; Koefoed, 1982]; nous ne rappelons que les hypothèses de son application: Le sondage électrique représenté constitue la réponse du domaine réaliste si celui-ci avait une extension infinie et si les couches avaient partout l'épaisseur qu'elles ont au droit du point de surface où il est réalisé. En outre, les résistivités électriques vraies sont supposées constantes dans chaque couche.

Le champ Résistivité électrique vraie est indépendant de celui de la variable Potentiel hydraulique. La variable produite (résistivité électrique apparente) ne reflète donc en aucun cas l'état de "saturation en eau de la roche".

Suggestion: Puisque la hauteur de la nappe est définie (cf annexe 2), il est possible, pour chaque classe d'équivalence, de corriger la valeur de Rhov selon que l'élément est dessus ou dessous cette hauteur. Si le sommet de la nappe est à l'intérieur d'un élément, on rajoute une couche fictive.

Fonctionnement

L'utilisateur indique de manière interactive les coordonnées (x,y) du point où il souhaite effectuer le sondage.

Le programme commence par vérifier que ce point n'est pas situé dans une zones urbaine. Il s'agit d'un ou plusieurs polygones définis dans une routine externe. En cas d'échec, l'opération est interrompue.

Le vecteur des épaisseurs des couches au droit de (x,y) est construit de la manière suivante:

- Recherche de l'élément de surface auquel appartient le point (x,y). Si (x,y) est en dehors de D2, le traitement est interrompu.
- Recherche des coordonnées (s,t) de ce point dans l'espace local. Comme les éléments ont tous des arétes verticales, ces coordonnées locales restent inchangées pour les éléments situés sous D2. On peut alors construire le vecteur des épaisseurs des couches rencontrées en appliquant les fonctions de transformation géométrique au coordonnées locales (s,t,-1.) pour chaque élément traversé.La construction du vecteur des numéros de classes d'équivalence des éléments traversés est simultanée. Ces tâches sont toutes exécutées par une routine externe.

Les longueurs de ligne à disposition sont les suivantes:

AB = 120 m
AB = 200 m
AB = 360 m
AB = 500 m
AB = 850 m
AB = 1500 m

Les résultats sont placés dans un fichier contenant pour chaque valeur intermédiaire de AB/2, celle de la résistivité apparente calculée. L'utilisateur ne peut pas changer les écartements intermédiaires auxquels sont faites les mesures. Quelque soit la longueur de ligne, le calcul est identique, mais l'écriture des résultats est tronquée à la longueur voulue (interpolation linéaire pour la dernière valeur).

Le tarif est indépendant de la longueur de ligne utilisée. Par contre, cette dernière est reportée dans l'historique des manipulations.

SPHINX: Resultat du sondage electrique No 1

Coordonnee en X: 902325.0 [m]
Coordonnee en Y: 220090.0 [m]

OA=	1.0==>	RHO app.=	259.
OA=	1.3==>	RHO app.=	259.
OA=	1.8==>	RHO app.=	258.
OA=	2.4==>	RHO app.=	256.
OA=	3.2==>	RHO app.=	253.
OA=	4.2==>	RHO app.=	246.
OA=	5.6==>	RHO app.=	233.
OA=	7.5==>	RHO app.=	209.
OA=	10.0==>	RHO app.=	173.
OA=	13.3==>	RHO app.=	129.
OA=	17.8==>	RHO app.=	91.
OA=	23.7==>	RHO app.=	66.
OA=	31.6==>	RHO app.=	59.
OA=	42.2==>	RHO app.=	64.
OA=	56.2==>	RHO app.=	77.

Figure 3.6: Exemple de modèle de sondage électrique (fichier de résultat)

Les résultats peuvent être relus par un utilitaire d'interprétation graphique des sondages électriques. Le fonctionnement de ce dernier est absolument identique, mais lit les valeurs d'épaisseur et de résistivité vraie à l'écran (données par l'utilisateur) au lieu de les lire dans le domaine réaliste. Il trace alors les courbes Rhoapp = f(AB/2) et l'interprétation se fait par superposition.
Du fait de la similarité des programmes de production du modèle et de son interprétation, il est possible d'interpréter parfaitement un sondage électrique.

Remarque: Se basant sur l'analogie entre les lois d'Ohm et de Darcy, nous avons envisagé la possibilité de construire des modèles numériques de sondages électriques. Dans ces conditions, les hypothèses simplificatrices des méthodes analytiques ne sont plus utiles et on pourrait réutiliser les programmes de modélisation des écoulements souterrains. Plusieurs difficultés apparaissent:

a - L'imposition d'un débit n'est possible qu'à un nœud; on ne pourrait donc autoriser la manipulation qu'en certains points de D2.

b - Un débit imposé à un nœud n'est pas ponctuel. Nous avons constaté que les valeurs calculées de potentiel sont inexactes pour des AB très petits. Cette difficulté est inhérente à la discrétisation par éléments finis: Un débit nodal représente en fait un débit sur toute la zone d'influence du nœud.

c - Dans le cas du trainé électrique, il faudrait faire fonctionner le programme autant de fois qu'il y a de stations, ce qui mènerait à des temps de calcul inacceptables. De plus, la raison évoquée sous **a** - rend impossible de reproduire un trainé avec espacement régulier entre les stations.

3.3.5 Trainés électriques

Le trainé est effectué selon un segment de droite dont il faut indiquer interactivement les extrémités. On spécifie également l'écartement entre les stations. Le programme vérifie qu'aucune des stations (maximum 500) n'est située dans une région interdite.

Deux longueurs de ligne sont à disposition: AB = 60 m
AB = 200 m

A chaque station, le modèle est identique à celui du sondage électrique; on n'inscrit cependant que la valeur (interpolée) correspondant au AB choisi.

Resultat du traine electrique No 1

RAPPEL DES PARAMETRES:

X1= 902325.0 [m] Y1= 220090.0 [m]
X2= 903100.0 [m] Y2= 221000.0 [m]
Longueur de ligne : 60 [m]
Longueur du pas : 150.00 [m]
Longueur du traine : 1195.29 [m]
Nombre de stations necessaires: 9

RESULTATS:

Coordonnees	X=	902325.0	Y=	220090.0	Rho app:	60.
Coordonnees	X=	902422.3	Y=	220204.2	Rho app:	60.
Coordonnees	X=	902519.5	Y=	220318.4	Rho app:	57.
Coordonnees	X=	902616.8	Y=	220432.6	Rho app:	69.
Coordonnees	X=	902714.0	Y=	220546.8	Rho app:	107.
Coordonnees	X=	902811.3	Y=	220661.0	Rho app:	158.
Coordonnees	X=	902908.5	Y=	220775.2	Rho app:	116.
Coordonnees	X=	903005.8	Y=	220889.4	Rho app:	68.
Coordonnees	X=	903100.0	Y=	221000.0	Rho app:	68.

Figure 3.7: Exemple de modèle de trainé électrique (fichier de résultat)

Le tarif est indépendant de la longueur du dispositif et vaut le nombre de stations que multiplie le prix unitaire. Dans l'historique des manipulations, on écrit le détail des stations (coordonnées et longueur de ligne).

3.3.6 Sondages mécaniques 2"

La désignation exacte de ce type de modèle est: Sondage mécanique vertical destructif de diamètre 2", equipé d'un tube piézométrique crépiné sur toute sa longueur, installé par battage.

"Destructif" signifie que la valeur du champ Nature pétrographique & Faciès, entre le sommet et la base de "l'ouvrage" n'est pas communiquée à l'utilisateur.
Le diamètre, 2", indique qu'il n'est pas possible, ultérieurement, d'imposer une valeur à la variable Débit (pas d'essais de pompage possible). Par contre, ces sondages peuvent être implantés en tout point de D2.
"Crépiné sur toute sa hauteur" correspond à la manière dont le logiciel calcule le niveau d'eau dans le piézomètre.
"Installé par battage" signifie que la profondeur maximum du sondage est contrôlée par le champ Résistance à l'avancement d'un piézomètre.

La manipulation consiste à lire dans le modèle hydrodynamique à l'état de repos (stocké) les valeurs de potentiel appropriées, puis à calculer le niveau d'eau.

PRELIMINAIRE

Les notions suivantes sont à distinguer:
- Le potentiel hydraulique, connu partout:
  - dans le système réel par un piézomètre ouvert uniquement à la base,
  - dans le modèle, par interpolation entre des valeurs nodales.

- La hauteur de la nappe, dont la définition est donnée, pour SPHINX, à l'**annexe 2**.

- Le niveau d'eau dans un piézomètre crépiné sur toute sa hauteur, qui n'est dans le cas général comparable ni à la hauteur de la nappe (l'**annexe 1** montre que dans le système réel, la seule présence de l'équipement modifie la distribution des potentiels), ni aux valeurs ponctuelles de potentiel à proximité de l'ouvrage.
  Remarquons que les seuls cas où le piézomètre crépiné fournit la valeur exacte de la hauteur de la nappe sont:
  - Dans le système réel, lorsque la base de l'ouvrage affleure cette hauteur,
  - Dans le modèle, quand la profondeur de l'ouvrage est nulle,
  - Quand le piézomètre est inscrit dans une surface équipotentielle (système réel et modèle).

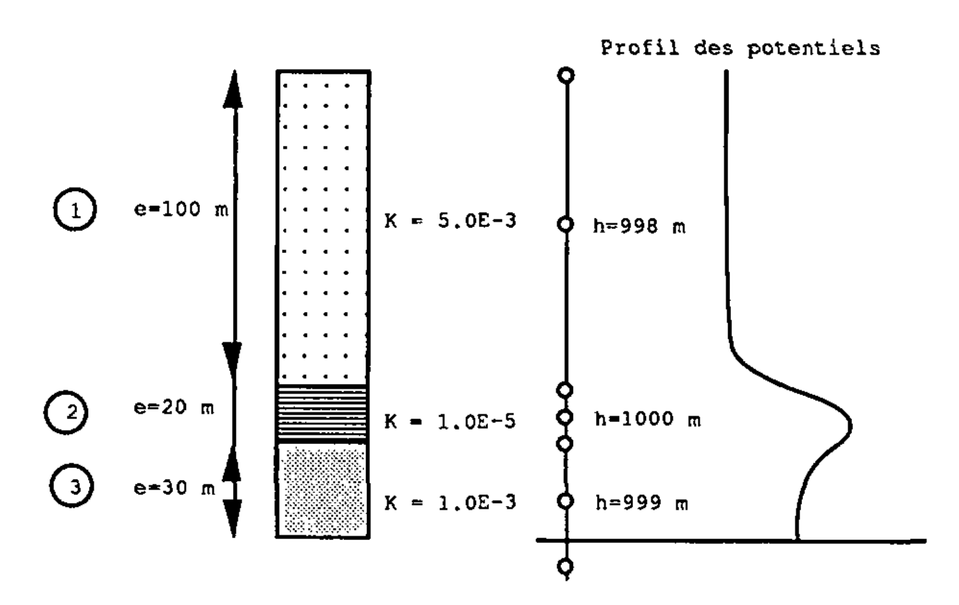
Dans le système réel, la question suivante se pose: Comment interpréter le niveau d'eau dans un un piézomètre crépiné en termes de potentiels ponctuels ?

Dans SPHINX, le problème, pour l'opérateur, est inverse: Disposant de valeurs ponctuelles de potentiel (calculées), comment reconstituer un niveau d'eau dans un tel piézomètre ?

Il faut choisir:

• Définition: Dans SPHINX, le niveau d'eau dans un piézomètre crépiné sur toute sa longueur est la moyenne des potentiels hydrauliques rencontrés entre la surface du domaine réaliste et la base de l'ouvrage, pondérée par l'épaiseur des niveaux traversés et par leur perméabilité (max(Kxx,Kyy,Kzz)).

Exemple:



$$\frac{(998 \times 5E\text{-}3 \times 100) + (1000 \times 1E\text{-}5 \times 20) + (999 \times 1E\text{-}3 \times 30)}{(5E\text{-}3 \times 100) + (1E\text{-}5 \times 20) + (1E\text{-}3 \times 30)} = 998.057 \text{ m}$$

Cette pondération tend à donner plus de poids aux niveaux les plus transmissifs. Une valeur ponctuelle relativement forte (ou faible) de potentiel sera ainsi "absorbée" par un niveau épais ou perméable.

Pour les forages 6", qui ne peuvent être installés qu'à la verticale des nœuds coins de surface, la valeur de potentiel utilisée pour chaque couche est celle du nœud milieu de l'arête verticale (cf illustration ci-dessus).
Pour les forages 2", on utilise la moyenne des potentiels aux interfaces supérieures et inférieures.
La dernière couche étant généralement partiellement traversée, le potentiel au bas du forage est obtenu par interpolation.
Bien que ne sachant pas reconstituer, dans le modèle, le niveau d'eau exact, il est possible de savoir, à coup sûr, si la nappe a été rencontrée par le sondage: Le cas défavorable est caractérisé par le fait que les potentiels hydrauliques rencontrés sont tous strictement inférieurs à la cote de la base du sondage. Il est alors cohérent que le logiciel produise le message:

"FORAGE SEC: Nappe non rencontrée."

SPHINX: Resultat du sondage mecanique No 1

Coordonnee en X: 902235.0 [m]
Coordonnee en Y: 221123.0 [m]
Coordonnee en Z: 810.00 [m]

Profondeur atteinte:- 1 metres.

FORAGE SEC: Nappe non rencontree.

Figure 3.8 Modèle de sondage mécanique 2", dans le cas où la nappe n'a pas été rencontrée.

Dans le cas contraire le résultat de l'opération est de la forme:

SPHINX: Resultat du sondage mecanique No 2

Coordonnee en X: 902800.0 [m]
Coordonnee en Y: 221500.0 [m]
Coordonnee en Z: 810.00 [m]

Profondeur atteinte: 11 metres.

Niveau d'eau: 808.03 metres.

Figure 3.9 Modèle de sondage mécanique 2", dans le cas où la nappe a été rencontrée. Profondeur initiale demandée : 40 [m].

Le modèle peut être produit en n'importe quel point de D2 dont les coordonnées (x,y) sont indiquées par l'utilisateur.

Fonctionnement

- Demande interactive des coordonnées et de la profondeur (nombre entier) du sondage,

- Construction du vecteur des épaisseurs des couches traversées et des numéros des classes d'équivalence correspondantes, comme pour les sondages électriques. Le sondage est considéré comme vertical parce que les arètes des éléments finis sont verticales et qu'on utilise pour calculer la cote des interfaces toujours les mêmes coordonnées locales s et t; ces dernières sont recherchées une fois pour toutes, au début du sondage, dans la couche d'éléments 2D de surface.
- Construction du vecteur des potentiels hydrauliques à la base de chaque élément (coordonnées locales (s,t,-1)). Le principe est le même que pour la recherche des côtes des interfaces entre éléments, en traitant cette fois les potentiels. On calcule ensuite la valeur de h au milieu du segment joignant 2 interfaces.
- Calcul du niveau d'eau et écriture des résultats.

Le programme représente l'installation d'un piézométre par battage et il peut arriver que le sondage ne puisse pas atteindre la profondeur demandée: Le programme autorise un nombre maximum (1000) de "coups" pour installer le piézomètre et la valeur du champ Résistance à l'avancement est donnée, pour chaque élément en nombres de coups pour descendre d'1 m. S'il faut plus de 1000 coups pour atteindre la profondeur voulue, le résultat est donné pour la profondeur qui a pu étre atteinte. Dans ce cas, l'utilisateur est informé, mais ne peut pas renoncer à la manipulation.

Il n'est pas permis d'effectuer, ultérieurement, d'essai de pompage dans les sondages 2". Cependant, ces derniers font l'objet d'un calcul de niveau d'eau lorsqu'un pompage est en cours dans un autre type d'équipement ("Tournée piézométrique").

La profondeur de l'ouvrage est donnée à priori par l'utilisateur. L'historique des manipulations est mis à jour. La facturation est spécifique; c'est une fonction linéaire de la profondeur et on ajoute éventuellement les "frais de déplacement de la machine", au cas où la manipulation effectuée juste avant n'est pas un sondage 2".

3.3.7 Sondages mécaniques 6" destructifs.

La désignation exacte de ce type de modèle est: Sondage mécanique vertical destructif de diamètre 6", équipé d'un tube piézométrique crépiné sur toute sa longueur.

Les différences principale entre les modèles de sondages 6" et ceux de sondage 2" sont:
- de permettre ultérieurement l'imposition d'une valeur du champ de la variable Débit.
- de ne pas faire intervenir le champ Résistance à l'avancement d'un piézomètre, de sorte que la profondeur du sondage est illimitée.
- de ne pouvoir être installés qu'à la verticale des nœuds coins de D2.

La niveau d'eau répond de la définition donnée au § 3.3.6. Le fichier de résultat est semblable à celui d'un piézomètre 2".

8056
SPHINX: Resultat du sondage mecanique No 3

Coordonnee en X:	902833.0 [m]
Coordonnee en Y:	221549.9 [m]
Coordonnee en Z:	810.00 [m]

Profondeur atteinte: 40 metres.

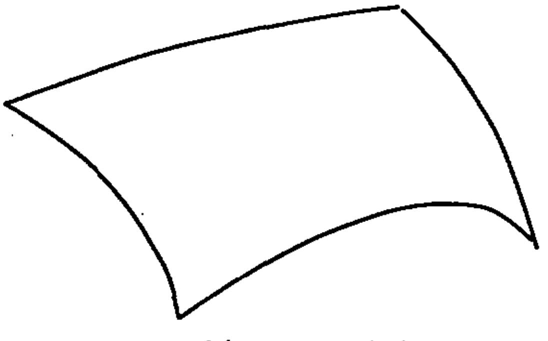
Niveau d'eau: 807.96 metres.

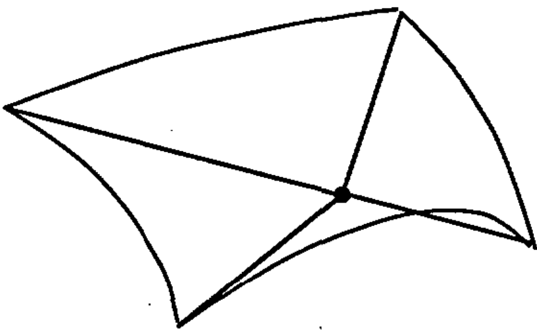
Figure 3.10 Modèle de sondage mécanique 6", dans le cas où la nappe a été rencontrée. Coordonnées initiales demandées: X = 902850 [m], Y = 221500 [m]. Profondeur initiale demandée: 40 [m].

PRELIMINAIRE

Il faut tenir compte, dès "l'installation" d'un sondage 6", des essais de pompage qui pourront y être fait: Dans le programme utilisé pour générer les modèle hydrodynamiques, l'imposition d'un débit se fait à un nœud coin. Comme le lieu où l'utilisateur souhaite installer le forage ne correspond en général pas aux coordonnées en (x,y) d'un nœud du réseau, plusieurs approches sont possibles:

- Déformer le réseau d'éléments finis afin de faire coïncider un nœud déjà existant avec le point choisi par l'utilisateur pour installer le sondage. Il s'ensuit que l'on déforme le champ des paramètres hydrogéologiques (K, S_s, etc), ce qui est inacceptable.
- Ajouter des nœuds et donc des éléments, à l'intérieur de l'élément préexistant dans lequel se trouve le point choisi. Dans les nouveaux éléments, les paramètres hydrogéologiques valent évidemment ce qu'ils sont dans l'élément initial. Celà est possible, mais selon les coordonnées choisies, le réseau modifié peut être mauvais en vue du calcul (valeurs nulles ou négatives du déterminant du Jacobien):


Elément 2D initial


Elément 2D modifié

Il serait possible de définir les nouveaux éléments d'abord dans l'espace local pour éviter au moins les croisements d'arêtes, mais une autre difficulté apparait: Lors d'un essai de pompage, le réseau est systématiquement affiné dans la région concernée. Le résultat de cette double modification est alors imprévisible.
- Enfin, et c'est la solution retenue, l'installation d'un piézomètre 6" n'est permise qu'aux nœuds préexistant (nœuds coins de surcroit). L'affinage du réseau lors d'un pompage ne pose alors pas de difficulté.
En pratique, le programme propose à l'utilisateur les coordonnées du nœud coin le plus proche du point voulu, à condition que ce nœud ni aucun de ceux placés à sa verticale ne soit l'objet d'une condition aux limites du modèle hydrodynamique.

Fonctionnement

- Demande interactive des coordonnées et de la profondeur (nombre entier) du sondage,
- Recherche des coordonnées du nœud coin le plus proche,
- Construction du vecteur des épaisseurs des couches traversées et des numéros des classes d'équivalence correspondantes. Ces informations sont disponibles directement, sans calcul, en lisant les fichiers décrivant D3.
- Construction du vecteur des potentiels hydrauliques aux nœuds milieux de la verticale au droit du point retenu. Comme les arêtes des éléments sont verticales, le sondage est vertical.
- Calcul du niveau d'eau et écriture des résultats.

Remarque: L'affinage du réseau n'est pas entrepris lors de l'installation des sondages mécaniques, mais seulement lors d'une opération de pompage ou de flowmètre.

La profondeur de l'ouvrage est donnée à priori par l'utilisateur. L'historique des manipulations est mis à jour. La facturation est spécifique; c'est une fonction linéaire de la profondeur et on ajoute éventuellement les "frais de déplacement de la machine", au cas où la manipulation effectuée juste avant n'est pas un sondage 6", quelque soit le genre exact de ce sondage (sondages 6" destructifs ou carottés, avec ou sans surveillance).

• Suggestion: Calculer le prix selon un fonction non linéaire de la profondeur.

3.3.8 Sondages mécaniques 6" carottés (sans surveillance).

La désignation exacte de ce type de modèle est: Sondage mécanique vertical de diamètre 6", équipé d'un tube piézométrique crépiné sur toute sa longueur.
La valeur du champ Nature pétrographique & faciès est indiquée à l'utilisateur pour toute la profondeur du sondage, d'où le terme "carotté".
"Sans surveillance" signifie que la profondeur du forage est donnée à priori par l'utilisateur, comme dans les cas précédents. Il n'y a donc pas moyen d'interrompre l'opération en cours.

8051
SPHINX: Resultat du sondage mecanique No 4

Coordonnee en X:	902704.4 [m]
Coordonnee en Y:	221600.2 [m]
Coordonnee en Z:	810.00 [m]

Profondeur atteinte: 55 metres.

De 810.00 metres a 794.70 metres (1): Graviers (fluvioglaciaire)
De 794.70 metres a 755.00 metres (2): Argiles lacustres

Niveau d'eau: 807.82 metres.

Figure 3.11 Modèle de sondage mécanique 6" carotté, non surveillé.

3.3.9 Sondages mécaniques 6" carottés (avec surveillance).

La surveillance du forage permet:
- De ne pas fixer à priori la profondeur de l'ouvrage. Après chaque progression de 2 m, le programme demande à l'utilisateur s'il veut continuer ou arrêter.
- A chaque "sortie du carottier", le programme indique la nature lithologique et le potentiel hydraulique au bas du tubage: En cours de forage, "l'équipement n'est pas crépiné".

Le modèle est constitué de 2 fichiers: Le premier est du même type que pour les sondages non surveillés:

8076
SPHINX: Resultat du sondage mecanique No 5

Coordonnee en X: 903029.0 [m]
Coordonnee en Y: 221949.0 [m]
Coordonnee en Z: 810.00 [m]

Profondeur atteinte: 8 metres.

De 810.00 metres a 804.55 metres (1): Graviers (fluvioglaciaire)
De 804.55 metres a 802.00 metres (2): Argiles lacustres

Niveau d'eau: 807.22 metres.

Figure 3.12a Modèle de sondage mécanique 6" carotté, avec surveillance. Lithologie et niveau d'eau.

Le second contient les potentiels hydrauliques en cours de forage (calculés par interpolation entre les valeurs nodales):

FORAGE SURVEILLE No 5
Potentiels hydrauliques mesures a chaque sortie du carottier.

Se reporter au fichier FORAGE_5.RES pour la lithologie.

De 810.00 metres a 808.00 metres : FORAGE SEC.
Fond du trou a 806.00 m: Potentiel hydraulique mesure: 807.22 [m]
Fond du trou a 804.00 m: Potentiel hydraulique mesure: 807.22 [m]
Fond du trou a 802.00 m: Potentiel hydraulique mesure: 807.16 [m]

Figure 3.12b Modèle de sondage mécanique 6" carotté, avec surveillance. Potentiels hydrauliques à chaque sortie du carottier.

La facturation au mètre est plus chère que dans le cas précédent.

3.3.10 Perméamètre à charge variable.

Le modèle permet la détermination <u>indirecte</u> de la composante verticale du champ de perméabilité. Ce n'est donc pas une observation.

Le programme demande dans quel forage carotté doit être prélevé l'échantillon destiné à l'essai, ainsi que la position de celui-ci dans la carotte. La longueur prélevé est de 0.5 m. Si l'échantillon contient

différents niveaux, la perméabilité du tout est obtenue par pondération.

L'utilisateur indique la hauteur initiale de la colonne d'eau (maximum 3 m) et le programme calcule l'évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps, qui constitue le résultat. Un plan d'échantillonage par défaut est proposé (de 5 à 240 s); il permet d'obtenir des variations significatives de hauteur d'eau pour une perméabilité moyenne. L'utilisateur peut en indiquer un autre.

Le modèle apparait à l'écran mais n'est pas stocké. Son interprétation en termes de perméabilité n'est pas soutenue par le logiciel.

Temps de la mesure [s]:	5.	H mesure:	2.99 [m]
Temps de la mesure [s]:	10.	H mesure:	2.99 [m]
Temps de la mesure [s]:	15.	H mesure:	2.98 [m]
Temps de la mesure [s]:	20.	H mesure:	2.97 [m]
Temps de la mesure [s]:	30.	H mesure:	2.96 [m]
Temps de la mesure [s]:	40.	H mesure:	2.94 [m]
Temps de la mesure [s]:	50.	H mesure:	2.93 [m]
Temps de la mesure [s]:	60.	H mesure:	2.92 [m]
Temps de la mesure [s]:	70.	H mesure:	2.90 [m]
Temps de la mesure [s]:	80.	H mesure:	2.89 [m]
Temps de la mesure [s]:	90.	H mesure:	2.88 [m]
Temps de la mesure [s]:	120.	H mesure:	2.84 [m]
Temps de la mesure [s]:	150.	H mesure:	2.80 [m]
Temps de la mesure [s]:	180.	H mesure:	2.76 [m]
Temps de la mesure [s]:	240.	H mesure:	2.68 [m]

Figure 3.13 Modèle de pèrméamètre à charge variable (Kz = 1.0E-6 [m/s]). Le référentiel des hauteurs d'eau est l'éxutoire du "dispositif expérimental". On suppose une précision de lecture d'1 cm.

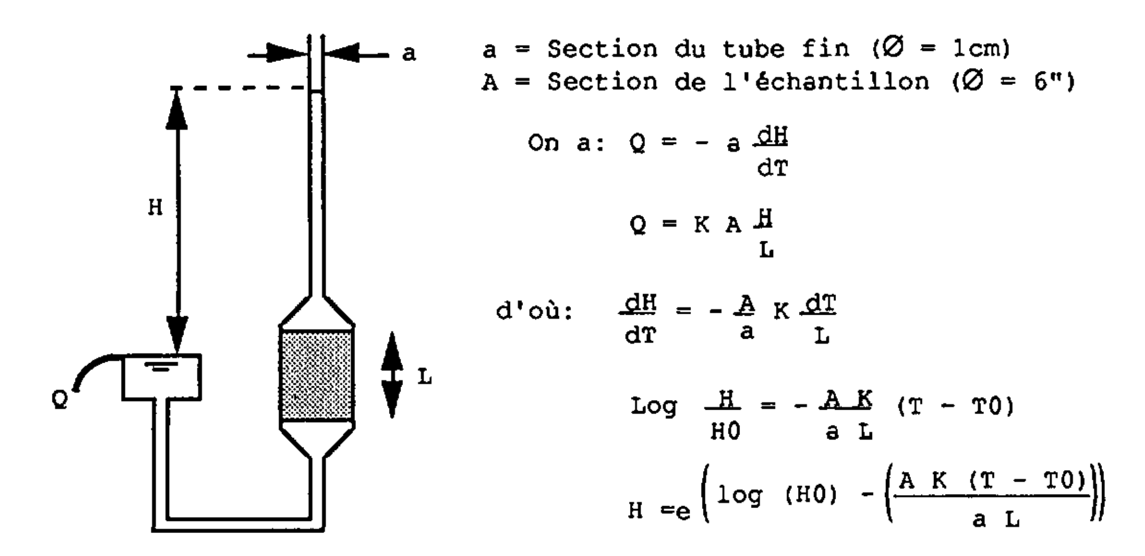


Figure 3.14 Dispositif expérimental simulé et solution utilisée pour le pèrméamètre à charge variable (d'après De Marsily, 1981). La longueur de l'échantillon est toujours L = 0.5 [m].

Remarque: Puisque les arétes des éléments sont verticales et donc que les forages sont verticaux, la composante de K selon z est obtenue par simple lecture du tenseur [K].

L'utilisation du perméamètre n'est pas facturée et ne figure pas dans l'historique des manipulations.

3.3.11 Essais de pompage de longue durée

GENERALITES SUR LES ESSAIS DE POMPAGE

Ce qu'est le modèle.
Le champ de potentiel hydraulique à l'état de repos est modifiable par l'utilisateur, qui peut imposer une condition de débit à un nœud de surface si un piézomètre de diamètre 6" est installé à ce nœud. Le modèle consiste en un calcul du **rabattement** dans tous les piézomètres existant (2" et 6"); L'**annexe 3** donne la définition du rabattement utilisée dans SPHINX.

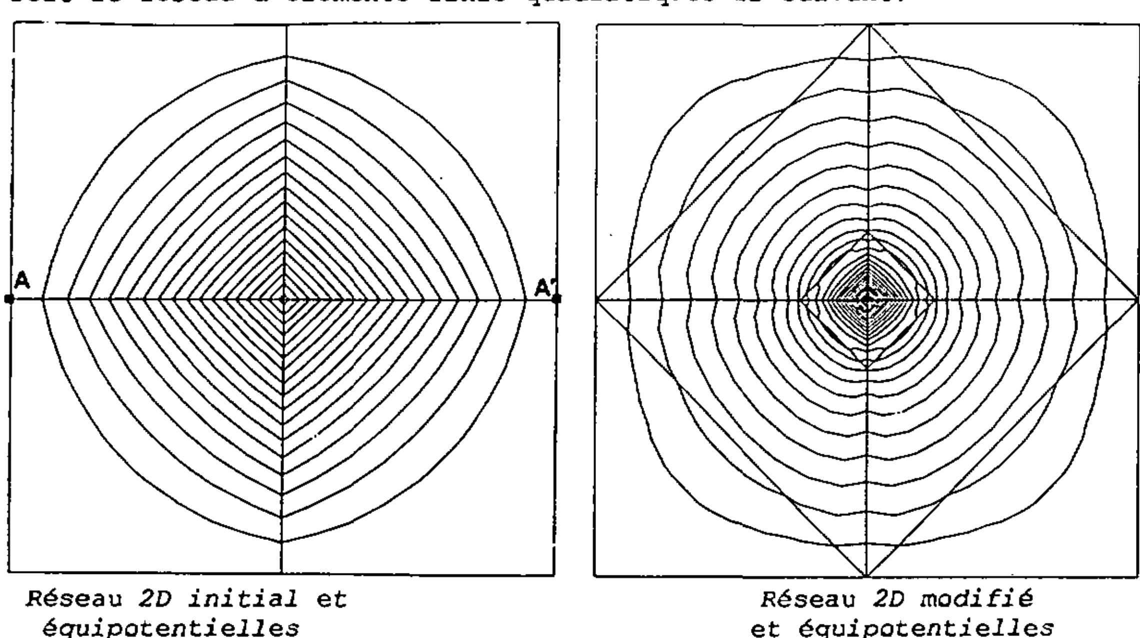
Combien y a t-il de pompes disponibles ?
Avant de construire le modèle hydrodynamique avec la condition de débit supplémentaire, le logiciel affine le réseau d'éléments finis dans la région du pompage. La modification du réseau autour de 2 nœuds, qui pourraient appartenir à un même élément, peut conduire à une géométrie incohérente du point de vue du calcul (enchevêtrement des éléments ajoutés). Pour cette raison, l'imposition d'un débit n'est permise qu'à un seul nœud à la fois; "Il n'y a qu'une pompe disponible".

Signification du diamètre des piézomètres.
Le piézomètre dans lequel a lieu le pompage est représenté par des éléments 1D verticaux à haute perméabilité. En principe, ces éléments ne peuvent tenir compte du diamètre du piézomètre, de sorte que ce diamètre ne sert qu'à fixer une valeur réaliste du débit maximum imposable. Il existe des pompes immergées de diamètre 6" dont le débit atteint 900 l/mn et varie peu avec la charge. Cette valeur maximum est retenue.
Il est par ailleurs interdit d'imposer un débit positif (injection), parce que le modèle hydrodynamique ne traite pas le cas d'un aquifère qui "déborde": que faire de "l'eau en trop", où la réinfiltrer ?

Pourquoi faut-il modifier le réseau d'éléments finis ?
La taille des éléments finis est à priori quelconque. Lors de la construction d'un modèle hydrodynamique par l'action de l'utilisateur (Essais de pompage ou de flowmètre), la fonction quadratique décrivant la distribution du potentiel hydraulique peut différer sensiblement, selon la taille des éléments voisins du lieu de pompage, de l'allure "analytique" des équipotentielles. On résoud cette difficulté en affinant automatiquement le réseau d'éléments finis à proximité du nœud à débit imposé.

Exemple:

Soit le réseau d'éléments finis quadratiques 2D suivant:



Réseau 2D initial et équipotentielles

Réseau 2D modifié et équipotentielles

Figure 3.15 Exemple de réseau 2D en plan, avant et après affinage autour du nœud à débit imposé.

Caractéristiques du modèle:
Longueur = Largeur = 400 m.
T = 1.0E-04 [m/s2],
Alimentation distribuée = 0.,
Q au nœud milieu = 0.01 [m3/s].
Potentiel hydraulique imposé sur tout le contour = 1000 [m].

En coupe, les potentiels calculés selon A - A' sont représentés à la figure 3.16.

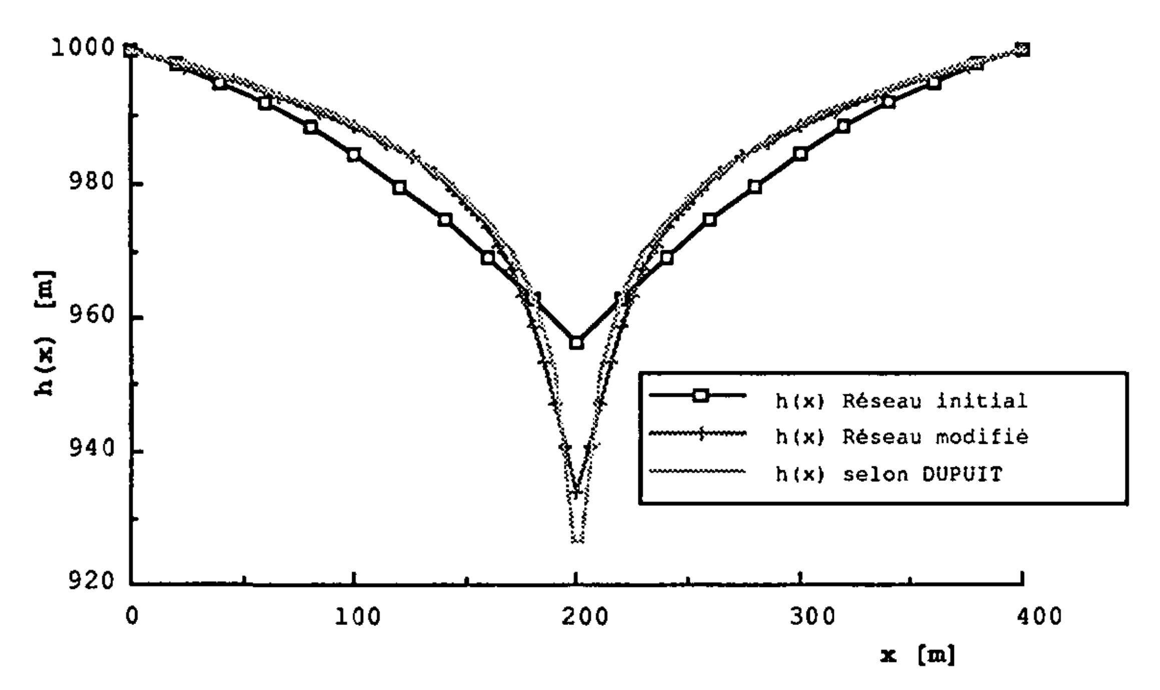


Figure 3.16: Réprésentation des potentiels hydraulique sur le réseau 2D selon une coupe (A - A'), avec le réseau initial, puis après modification du réseau. La solution de Dupuit est considérée comme référence.

Les piézomètres 2" peuvent être installés n'importe où dans le réseau et pas seulement aux nœuds majeurs. En imaginant que de tels piézomètres seront implantés à proximité des nœuds à débit imposé, cet exemple illustre la nécessité de procéder à l'affinage du réseau. L'utilisateur pourra alors interpréter l'essai de pompage avec des solutions analytiques, dans la mesure des restrictions données par D3 uniquement, sans que la nature "quadratique" des fonctions de potentiel soit une source d'erreur supplémentaire.

Comment modifie t-on le réseau ?

Le programme ajoute des éléments autour du nœud à débit imposé, sur toute l'épaisseur de D3, quelque soit la profondeur du piézomètre 6". Selon le type d'élément à modifier, on procède comme indiqué à la figure 3.15.
Puis on ajoute des éléments 1D au droit du piézomètre, jusqu'au nœud situé immédiatement sous le fond de celui-ci. Comme les arêtes sont initialement verticales, cette dernière modification n'entraine pas la création de nouveaux nœuds. Il faut voir ici la raison pour laquelle les arètes doivent être verticales; l'ajout d'éléments 1D qui devraient traverser des éléments 2 ou 3D à arètes non verticales demanderait un effort de programmation qui ne nous a pas semblé prioritaire. De plus, il faudrait introduire des éléments pyramidaux dont la forme dans l'espace réel se prête parfois mal au calcul d'écoulement en régime transitoire.

Les éléments 1,2 ou 3D ajoutés ailleurs que sur la verticale du piézomètre le sont sur toute l'épaisseur de *D3*. Deux possibilités s'offrent pour le choix des coordonnées en (x,y) des nœuds ajoutés:

- En travaillant dans l'espace local (p.ex. 0.1 en partant du nœud à la verticale du piézomètre), mais dans le cas de grands éléments, les nouveaux nœuds seraient trop loin, et de plus irrégulièrement répartis selon la taille des éléments.
- En fixant la distance dans l'espace global, on est sûr d'avoir une taille raisonnable des éléments nouveaux: Cette distance vaut le 1/6ème de la distance au nœud initial le plus proche et au maximum 20 [m]. On peut ainsi traiter des éléments initiaux de taille quelconque. Les éléments biscornus peuvent cependant avoir pour conséquence le calcul de coordonnées nouvelles menant à des éléments trop déformés, voire faux. L'opérateur doit en tenir compte dans la discrétisation initiale.

Sur z, les coordonnées des nouveaux nœuds sont obtenues en moyennant celles des nœuds préexistant.

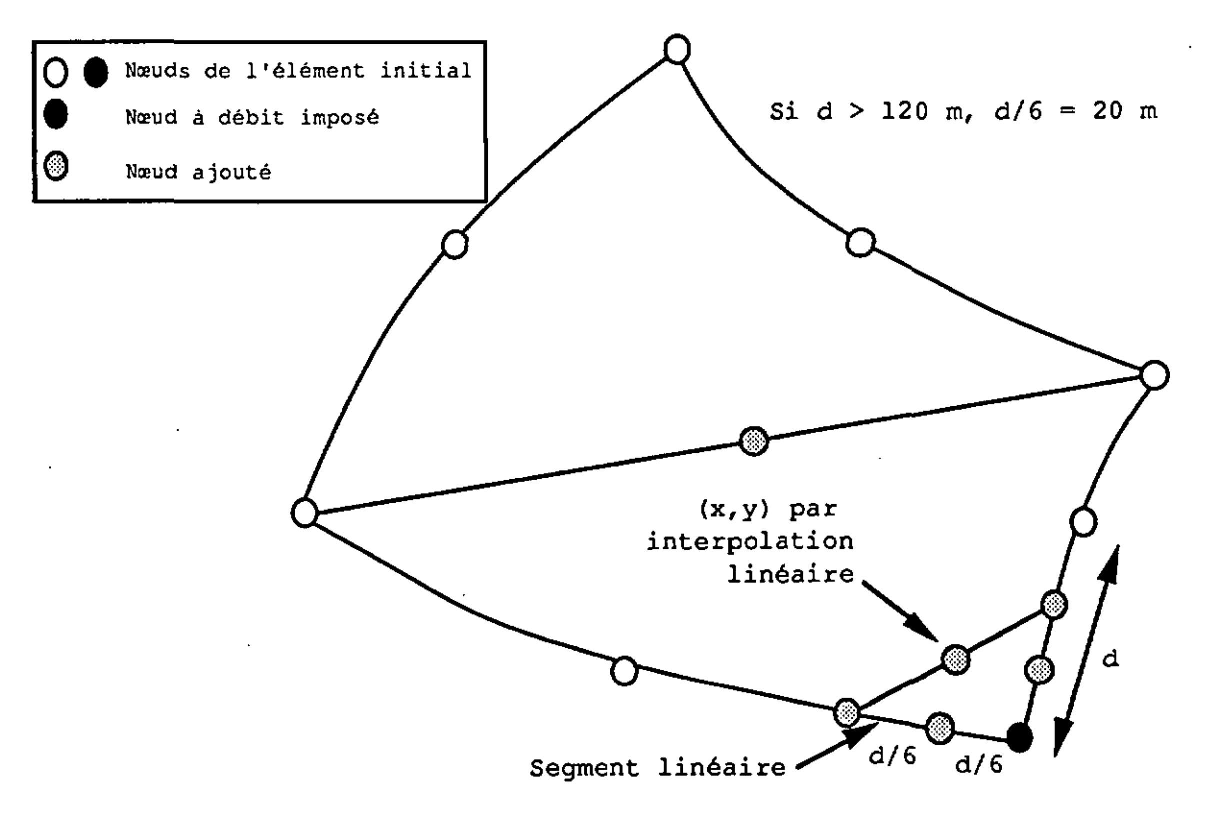


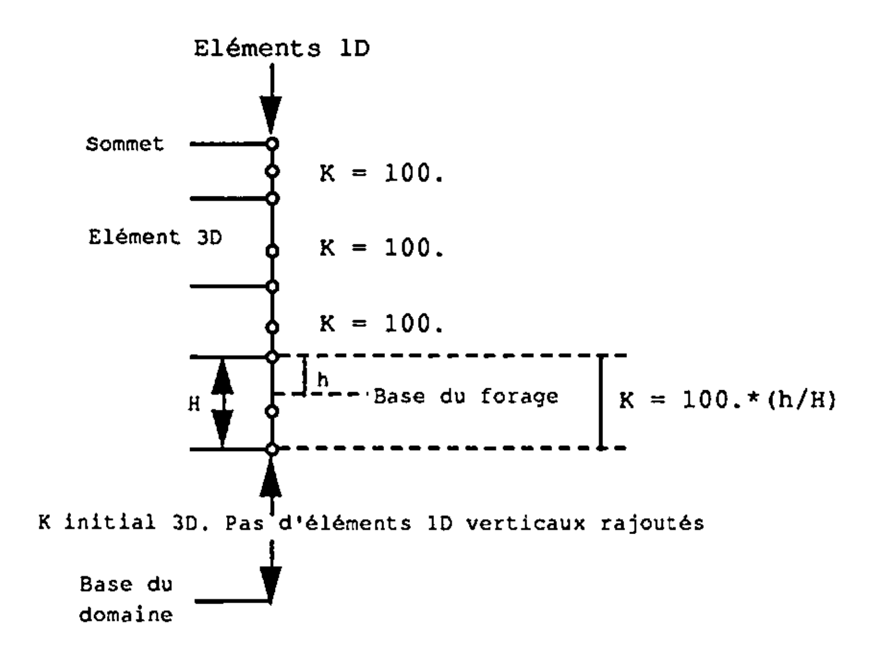
Figure 3.17 Principe d'affinage du réseau d'éléments finis au voisinage d'un nœud à débit imposé par l'utilisateur. Illustration pour un réseau 2D en plan; dans ce cas, on n'ajoute évidemment pas d'éléments 1D.

Valeur de K dans les éléments 1D

Pour que le potentiel soit constant dans le piézomètre, une très grande perméabilité doit être assignée aux éléments 1D. Des essais systématiques ont montré que pour K = 100 [m/s], le forage est toujours inscrit dans une surface équipotentielle. Le contraste $K_{\text{éléments 3D}}/K_{\text{éléments 1D}}$ est

une raison supplémentaire pour affiner le maillage à proximité de l'ouvrage.

Si la cote de la base du sondage ne correspond pas à un nœud, la perméabilité de l'élément 1D le plus bas est obtenue par pondération:



Pourquoi pomper au nœud de surface ?
Etant donné la grande perméabilité des éléments 1D, le potentiel sera le même quelque soit le nœud faisant partie de ces éléments auquel on impose le débit. Par convention, on choisit le nœud de surface.

Pourquoi le modèle consiste t-il en un rabattement au lieu d'un niveau d'eau ?
Le simple fait d'affiner le réseau d'éléments finis dans la région du pompage modifie la distribution des potentiels hydrauliques. Ainsi, même en l'absence d'une condition de débit supplémentaire, l'état de l'aquifère n'est pas tout à fait identique à l'état de repos (stocké en permanence et duquel sont issus les niveaux d'eau lors des opérations de forage).

Pour comparer ce qui est comparable, il n'y a pas d'autre moyen que de communiquer à l'utilisateur la différence entre deux états de l'aquifère avec D3 discrétisé de la même manière.

Pourquoi un modèle numérique ?
La simulation d'un essai de pompage nécessite, telle que nous l'avons abordée, des calculs importants. Ce sont les modèles numériques qui consomment le plus de temps de calcul, demandent une mémoire que seules offrent les grosses machines. On peut formuler les critiques suivantes:
- Le débit des essais de pompage est suffisamment faible pour que ,dans la plupart des cas, une solution analytique soit admissible (pas d'effets latéraux).

- Il serait donc possible de simplifier considérablement le logiciel et de l'installer sur des ordinateurs plus petits.
Ces critiques sont fondées, mais l'argument en faveur de la solution retenue est le suivant: Le champ des potentiels (hydrauliques ou chimiques) et des débits doit être cohérent avec celui des paramètres du domaine réaliste. Celà signifie que, sans modèle numérique, il ne serait pas même possible de construire un champ vraisemblable de potentiels à l'état de repos. Dès lors, pour l'opérateur, comment situer par exemple la hauteur de la nappe ?

Les essais de pompage de longue durée correspondent à la construction du modèle hydrodynamique avec une condition de débit supplémentaire, imposée par l'utilisateur. Dans ce modèle, l'équation LP1 de l'annexe 2 est vérifiée en tout point de D3, en négligeant la dérivée temporelle. Le participant est averti que les résultats représentent l'état de l'aquifére après une durée suffisamment longue pour qu'un équilibre soit atteint.

SPHINX: Fichier SPHINX$DISK:[000000]GEHTACH-9-JAN-1992.TPZ_1;1

RESULTAT DE POMPAGE D'ESSA1.

Rappel des parametres des piezometres:

Numero:	1;	X= 902235.0 [m];	Y= 221123.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 1 [m]
Numero:	2;	X= 902800.0 [m];	Y= 221500.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 11 [m]
Numero:	3;	X= 902833.0 [m];	Y= 221549.9 [m];	Z= 810.00;	Prof: 40 [m]
Numero:	4;	X= 902704.4 [m];	Y= 221600.2 [m];	Z= 810.00;	Prof: 55 [m]
Numero:	5;	X= 903029.0 [m];	Y= 221949.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 8 [m]

Pompage dans le piezometre No 3 ; Debit: -900. [l/mn]

....
Pompage de longue duree
....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.08 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.17 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.06 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.02 [m]

Figure 3.18 Modèle d'essai de pompage de longue durée.

Le rabattement est calculé dans tous les piézomètres existant (2" ou 6"). La facturation comprend un prix de base plus le nombre de points d'échantillonage que multiplie un prix unitaire.

3.3.12 Essais de pompage de durée limitée

La différence par rapport au cas précédent est que la dérivée temporelle de l'équation LP1 n'est pas nulle. Le logiciel produit donc des états intermédiaires de la nappe soumise à une condition de débit.

Le participant doit indiquer, outre le lieu du pompage et le débit, les temps auxquels il souhaite connaitre les rabattements.
Le programme fonctionne autant de fois qu'il y a d'échantillonnage; chaque pèriode simulée utilise comme condition initiale le résultat du calcul précédent.

Choix du pas de temps

En l'absence de critère de stabilité précis pour les modèles tridimensionnels, le pas de temps vaut le 1/10ème de la période simulée.

Exemple:

Plan d'échantillonage	Pas de temps
1 mn	6 s
10 mn	1 mn
...	

SPHINX: Fichier SPHINX$DISK:[000000]GEHTACH-9-JAN-1992.TPZ_2;1

RESULTAT DE POMPAGE D'ESSAI.

Rappel des parametres des piezometres:

Numero:	1;	X= 902235.0 [m];	Y= 221123.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 1 [m]
Numero:	2;	X= 902800.0 [m];	Y= 221500.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 11 [m]
Numero:	3;	X= 902833.0 [m];	Y= 221549.9 [m];	Z= 810.00;	Prof: 40 [m]
Numero:	4;	X= 902704.4 [m];	Y= 221600.2 [m];	Z= 810.00;	Prof: 55 [m]
Numero:	5;	X= 903029.0 [m];	Y= 221949.0 [m];	Z= 810.00;	Prof: 8 [m]

Pompage dans le piezometre No 3 ; Debit: -900. [l/mn]

....

Temps: 180 [s] 3.00 [min] 0.0500 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.02 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 600 [s] 10.00 [min] 0.1667 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.04 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 1800 [s] 30.00 [min] 0.5000 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.06 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 3600 [s] 60.00 [min] 1.0000 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.07 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 43200 [s] 720.00 [min] 12.0000 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.02 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.09 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.00 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 86400 [s] 1440.00 [min] 24.0000 [heures]

....

Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.02 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.10 [m]
Piezometre No	4	Rabattement:	0.01 [m]
Piezometre No	5	Rabattement:	0.00 [m]

....

Temps: 172800 [s] 2880.00 [min] 48.0000 [heures]

....

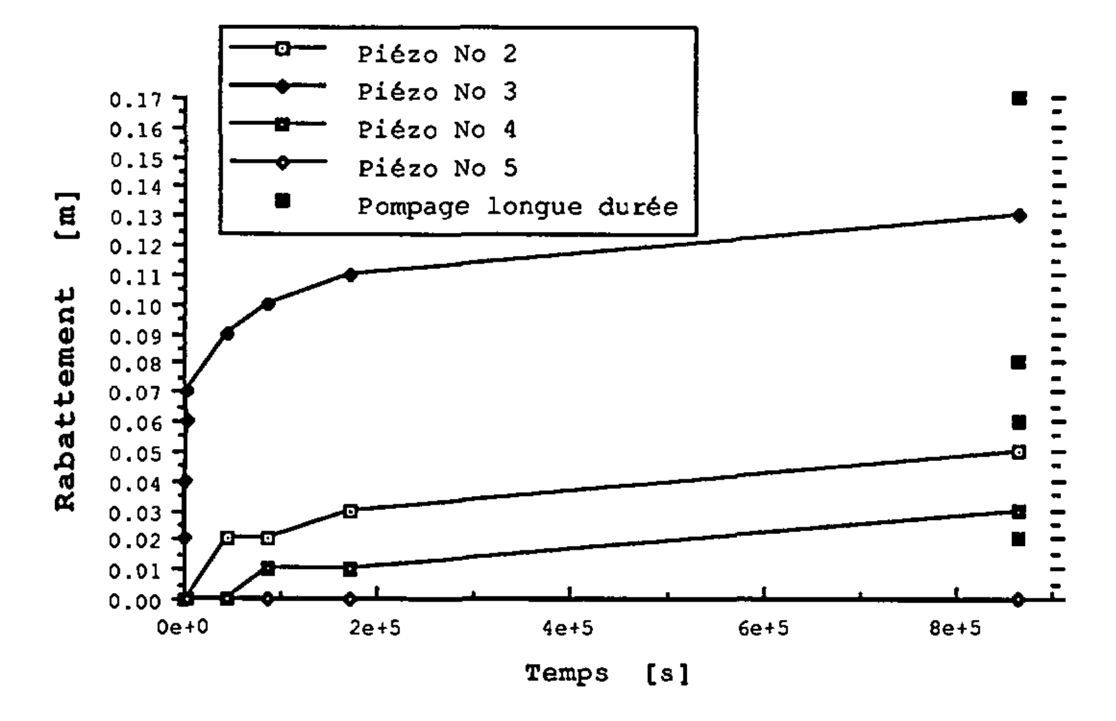
Piezometre No	1	Piezometre SEC	
Piezometre No	2	Rabattement:	0.03 [m]
Piezometre No	3	Rabattement:	0.11 [m]

Piezometre No 4 Rabattement: 0.01 [m]
Piezometre No 5 Rabattement: 0.00 [m]

....
Temps: 864000 [s] 14400.00 [min] 240.0000 [heures]
....

Piezometre No 1 Piezometre SEC
Piezometre No 2 Rabattement: 0.05 [m]
Piezometre No 3 Rabattement: 0.13 [m]
Piezometre No 4 Rabattement: 0.03 [m]
Piezometre No 5 Rabattement: 0.00 [m]

Figure 3.19 Exemple de modèle de pompage de durée limitée. Ci-dessous, représentation graphique de ces mêmes résulats (Non soutenue par le logiciel).



Le coût de l'opération comprend un prix de base plus le nombre de pèriodes d'échantillonage que multiplie le nombre de piézomètres fois un prix unitaire.

3.3.13 Flowmètre

Le flowmètre (moulinet) est destiné à indiquer la composante verticale du débit circulant dans les éléments verticaux 1D au droit d'un nœud de surface à débit imposé. Comme pour les essais de pompage ,le piézomètre 6" dans lequel a lieu l'essai est représenté par une colonne d'éléments 1D verticaux à haute perméabilité. Ils permettent l'assimilation des débits nodaux à des débits verticaux.

Définition: Le débit à l'intérieur du piézomètre est représenté par la somme des débits nodaux, partant du nœud majeur situé immédiatement sous la cote du fond de l'ouvrage jusqu'au nœud de surface. Ce profil est ensuite transformé pour valoir 0 à la cote du fond de l'ouvrage et le débit imposé ("de la pompe") à la cote du niveau d'eau.
L'**annexe 4** illustre cette définition.

Principe

Dans le forage choisi pour l'essai, on impose le débit voulu au nœud de surface, puis on construit le modèle hydrodynamique (régime permanent) avec cette condition aux limites supplémentaire. Le potentiel hydraulique calculé aux nœuds des éléments 1D (≈ constant) est utilisé comme condition aux limites pour un deuxième modèle, qui calcule alors les débits nodaux.

En pratique, on distingue les étapes suivantes:

- Modification du réseau d'éléments finis dans la région du forage considéré. Les éléments verticaux 1D à très haute perméabilité, ajoutés depuis le sommet jusqu'à la base de l'ouvrage, ont pour fonction de permettre l'assimilation des débits nodaux à des débits verticaux et de garantir que le potentiel est ≈ constant.

- Construction d'un premier modèle (état 1) avec le réseau modifié et les conditions aux limites inchangées (sans débit imposé au nœud supérieur). On obtient ainsi un état de l'aquifère au repos pour la discrétisation affinée du domaine.

- Construction d'un deuxième modèle (état 2), en ajoutant cette fois la condition de débit imposé au sommet de la colonne d'éléments 1D.

- Construction du troisième modèle (état 3), en imposant dans les éléments 1D les potentiels hydrauliques calculés dans l'état 2 et en supprimant la condition de débit.

Les 3 modèles correspondent à des situations stationnaires (régime permanent).
L'état 1 est utilisé pour calculer le rabattement dans le piézomètre. Ainsi, on peut tester que "la pompe n'est pas dénoyée" et inscrire les résultats du flowmètre uniquement pour des cotes comprises entre la valeur du niveau d'eau initial moins le rabattement et la base du sondage.
Remarque: Au lieu de calculer l'état 1, on pourrait lire le modèle stocké (conditions aux limites identiques, mais réseau non modifié). Comme le simple fait d'affiner la discrétisation change légèrement la distribution des potentiels, on est contraint au calcul de l'état 1.

- Traitement des débits calculés dans l'état 3: Le profil des débits dans le piézomètre est obtenu par sommation, en partant du nœud coin situé immédiatement sous le fond, des débits nodaux calculés. Enfin, ce profil est corrigé afin d'obtenir 0 à la base de l'ouvrage et le total des débits nodaux à la cote valant le niveau d'eau initial moins le

rabattement. Ce total des débits vaut le débit imposé par l'utilisateur ("débit de la pompe").

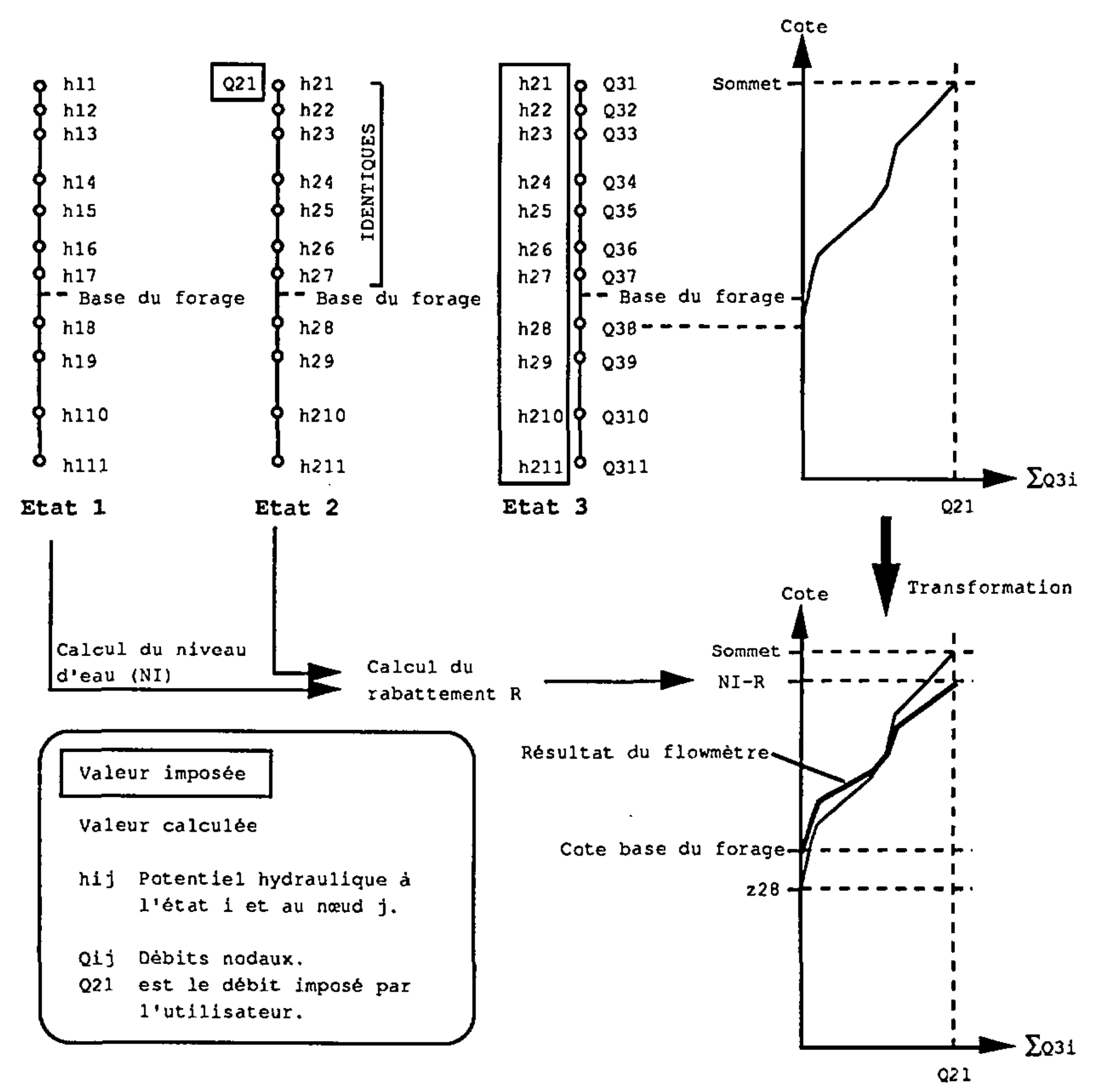


Figure 3.20 Processus de construction du modèle de flowmètre.

SPHINX: Resultat de flowmetre.

Les flux indiques sont des vitesses verticales.
Les valeurs negatives indiquent des vitesses ascendantes.

Piezometre No: 3
Cote du sommet du piezometre: 810.00 [m]
Cote du fond du puits: 770.00 [m]
Debit: -900. [l/mn]

Altitude du point: 807.79	Valeur du flux: -0.01498 [m3/s]	<=> 900 [l/mn]
Altitude du point: 807.54	Valeur du flux: -0.01465 [m3/s]	
Altitude du point: 807.29	Valeur du flux: -0.01432 [m3/s]	
Altitude du point: 807.04	Valeur du flux: -0.01400 [m3/s]	
Altitude du point: 806.79	Valeur du flux: -0.01367 [m3/s]	
...		
...		
...		
Altitude du point: 770.18	Valeur du flux: 0.00000 [m3/s]	

Figure 3.21a Exemple de modèle de flowmètre. Les résultats sont donnés directement en termes de flux. Moyennant un etalonnage, il serait possible de calculer la vitesse de rotation de l'hélice.

SPHINX: Resultat de flowmetre.

Les flux indiques sont des vitesses verticales.
Les valeurs negatives indiquent des vitesses ascendantes.

Le piezometre a ete denoye pendant le pompage.

OPERATION INTERROMPUE

Essayez avec un debit plus faible.

Figure 3.21b Exemple de modèle de flowmètre dans le cas où (niveau d'eau initial - rabattement) est plus petit que la cote du bas du piézomètre.

3.3.14 Vitesse réelle.

Pour connaitre la circulation des eaux souterraines, les hydrogéologues utilisent fréquemment les essais de coloration. Un modèle de transport de matière pourrait étre utilisé pour représenter de tels essais dans SPHINX. Cependant, les difficultés suivantes apparaissent:
- les temps de calcul nécessaires sont trop importants pour obtenir de bons résultats; le pas de temps doit être petit en raison de la taille variable des éléments.
- Les éléments finis de D3 ont une grande extension latérale en regard de leur épaisseur et il est difficile de garantir la stabilité du calcul.
- Les valeurs obtenues dans les piézomètres 2" situés à proximité du point d'injection peuvent être trop élevées, parce que les fonctions d'interpolation quadratiques "étalent" beaucoup trop les concentrations.

Pour remplacer le modèle d'essai de traçage, il existe dans SPHINX un outil "Vitesse réelle", sans equivalence dans la réalité, dont l'objet est de communiquer à l'utilisateur les composantes en (x,y,z) de la vitesse réelle de l'eau à la verticale d'un sondage mécanique (2" ou 6"). La vitesse est calculée tous les 0.2 [1] dans l'espace local selon la verticale; les résultats sont inscrits entre le niveau d'eau dans le forage et sa base.

La vitesse est calculée comme suit:

Connaissant les coordonnées locales (s,t,u), calcul des dérivées [FD] des fonctions d'interpolation et du jacobien [J],

$[GR1] = [FD] \cdot [J]^{-1}$ = gradient

$[GR2] = [GR1] \cdot [K]$; [K] = Perméabilité anisotrope.

$\{F\} = [GR2]^T \cdot \{h_i\}$ = flux ; $\{h_i\}$ = Potentiels nodaux.

$\{V\} = \{F\} / m$ = vitesse réelle ; m = porosité efficace.

....
VITESSE REELLE
....

Rappel des parametres du piezometre:

NUMERO 4
Coordonnee en X: 902704.4 [m]
Coordonnee en Y: 221600.2 [m]
Coordonnee en Z: 810.00 [m]
Profondeur atteinte: 55 metres.

Vitesse REELLE de l'eau a la verticale de (X,Y)

Altitude [m]	COMPOSANTES DE LA VITESSE [m/s] sur X	sur Y	sur Z
806.94	0.175E-04	0.174E-03	0.000E+00
805.41	0.176E-04	0.174E-03	0.000E+00
803.88	0.177E-04	0.174E-03	0.000E+00
802.35	0.178E-04	0.174E-03	0.000E+00
800.82	0.179E-04	0.174E-03	0.000E+00
799.29	0.180E-04	0.173E-03	0.000E+00
797.76	0.181E-04	0.173E-03	0.000E+00
796.23	0.183E-04	0.173E-03	0.000E+00
794.70	0.164E-07	0.174E-06	0.124E-06
790.50	0.480E-08	0.179E-06	0.120E-06
786.30	-0.664E-08	0.184E-06	0.116E-06
782.10	-0.179E-07	0.189E-06	0.112E-06
777.90	-0.291E-07	0.194E-06	0.109E-06
773.70	-0.401E-07	0.199E-06	0.105E-06
769.50	-0.510E-07	0.204E-06	0.101E-06
765.30	-0.617E-07	0.209E-06	0.971E-07
761.10	-0.723E-07	0.214E-06	0.933E-07
756.90	-0.827E-07	0.218E-06	0.895E-07

Figure 3.22 Résultat d'application de l'outil Vitesse réelle. Le calcul est effectué tous les 0.2 [l] selon la verticale dans l'espace local. Les résultats sont inscrits entre le niveau d'eau et la base de l'ouvrage. Les valeurs de vitesse sont filtrées à 1.0D-10.

Cas des forages 2".

Les coordonnées locales (s,t) doivent être recherchées à priori, à partir des coordonnées globales (x,y) du lieu du forage. On procède ensuite comme ci-dessus.

Cas des forages 6".

Puisque ces forages ne se trouvent qu'au nœuds coins des éléments, les coordonnées (s,t) sont aisément trouvées: (±1, ±1). Par contre, on ne sait pas à quel élément riverain de l'arête verticale emprunter [K], m ou $\{h_i\}$. Le modèle consiste en la moyenne arithmétique des vitesses calculées pour tous les éléments ayant en commun l'arête verticale considérée (cf figure 3.22 bis).

Altitude (m)	Elément 1 (x)	Elément 2 (x)	Elément 3 (x)	Elément 4 (x)	Elément 1 (y)	Elément 2 (y)	Elément 3 (y)	Elément 4 (y)	Elément 1 (z)	Elément 2 (z)	Elément 3 (z)	Elément 4 (z)
756.90	-1.40E-07	-1.41E-07	-2.44E-08	-2.54E-08	2.53E-07	2.46E-07	1.88E-07	1.86E-07	8.95E-08	8.95E-08	8.95E-08	8.95E-08
761.10	-1.22E-07	-1.24E-07	-2.09E-08	-2.19E-08	2.44E-07	2.38E-07	1.87E-07	1.85E-07	9.33E-08	9.33E-08	9.33E-08	9.33E-08
765.30	-1.05E-07	-1.06E-07	-1.73E-08	-1.83E-08	2.35E-07	2.30E-07	1.86E-07	1.84E-07	9.71E-08	9.71E-08	9.71E-08	9.71E-08
769.50	-1.36E-08	-1.46E-08	-8.72E-08	-8.85E-08	1.85E-07	1.83E-07	2.27E-07	2.22E-07	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07	1.01E-07
773.70	-1.08E-08	-6.94E-08	-7.06E-08	-9.67E-09	1.82E-07	2.18E-07	2.13E-07	1.84E-07	1.05E-07	1.05E-07	1.05E-07	1.05E-07
777.90	-5.13E-08	-5.25E-08	-5.61E-09	-6.89E-09	2.09E-07	2.05E-07	1.83E-07	1.81E-07	1.09E-07	1.09E-07	1.09E-07	1.09E-07
782.10	-1.40E-09	-2.90E-09	-3.31E-08	-3.43E-08	1.82E-07	1.79E-07	2.00E-07	1.96E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07	1.12E-07
786.30	1.19E-09	2.95E-09	-1.47E-08	-1.60E-08	1.78E-07	1.81E-07	1.91E-07	1.87E-07	1.16E-07	1.16E-07	1.16E-07	1.16E-07
790.50	2.55E-09	3.84E-09	5.37E-09	7.45E-09	1.77E-07	1.82E-07	1.76E-07	1.80E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.20E-07
794.70	1.21E-08	2.12E-08	2.26E-08	9.64E-09	1.79E-07	1.68E-07	1.73E-07	1.74E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
796.23	1.09E-05	2.63E-05	2.76E-05	8.30E-06	1.81E-04	1.66E-04	1.71E-04	1.75E-04	1.08E-16	2.27E-16	5.04E-17	6.23E-17
797.76	1.07E-05	2.62E-05	2.76E-05	8.05E-06	1.81E-04	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	-2.87E-16	-3.36E-17	1.11E-16	5.83E-17
799.29	1.04E-05	2.62E-05	2.76E-05	7.82E-06	1.81E-04	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	-2.13E-16	1.14E-17	-9.26E-17	-2.07E-18
800.82	1.02E-05	2.62E-05	2.76E-05	7.58E-06	1.81E-04	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	9.13E-17	-3.77E-18	1.14E-16	3.87E-17
802.35	1.00E-05	2.62E-05	2.76E-05	7.35E-06	1.81E-04	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
803.88	2.62E-05	2.76E-05	7.13E-06	9.79E-06	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	1.81E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
805.41	2.62E-05	2.76E-05	6.91E-06	9.58E-06	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	1.81E-04	-3.44E-18	-4.83E-17	6.24E-17	7.37E-17
806.94	2.62E-05	2.76E-05	6.69E-06	9.36E-06	1.66E-04	1.71E-04	1.76E-04	1.82E-04	2.36E-16	1.09E-16	-8.58E-17	8.75E-17

Figure 22 bis. Détail des valeurs de vitesse pour les 4 éléments riverains de l'arête verticale.

3.3.15 Utilitaires

Un certain nombre de programmes annexes aident l'utilisateur dans son travail de prospection. Il ne s'agit pas à proprement parler de modèles, mais d'assistance à l'exploitation de ceux-ci; nous mentionnons ici les plus importants.

- Carte des opérations effectuées.

Toutes les opérations inscrites dans l'historique des manipulations peuvent être reportées sur une carte. C'est un moyen de contrôle et une base de travail importante, dans la mesure où, en prospection simulée, "le terrain, c'est la carte".

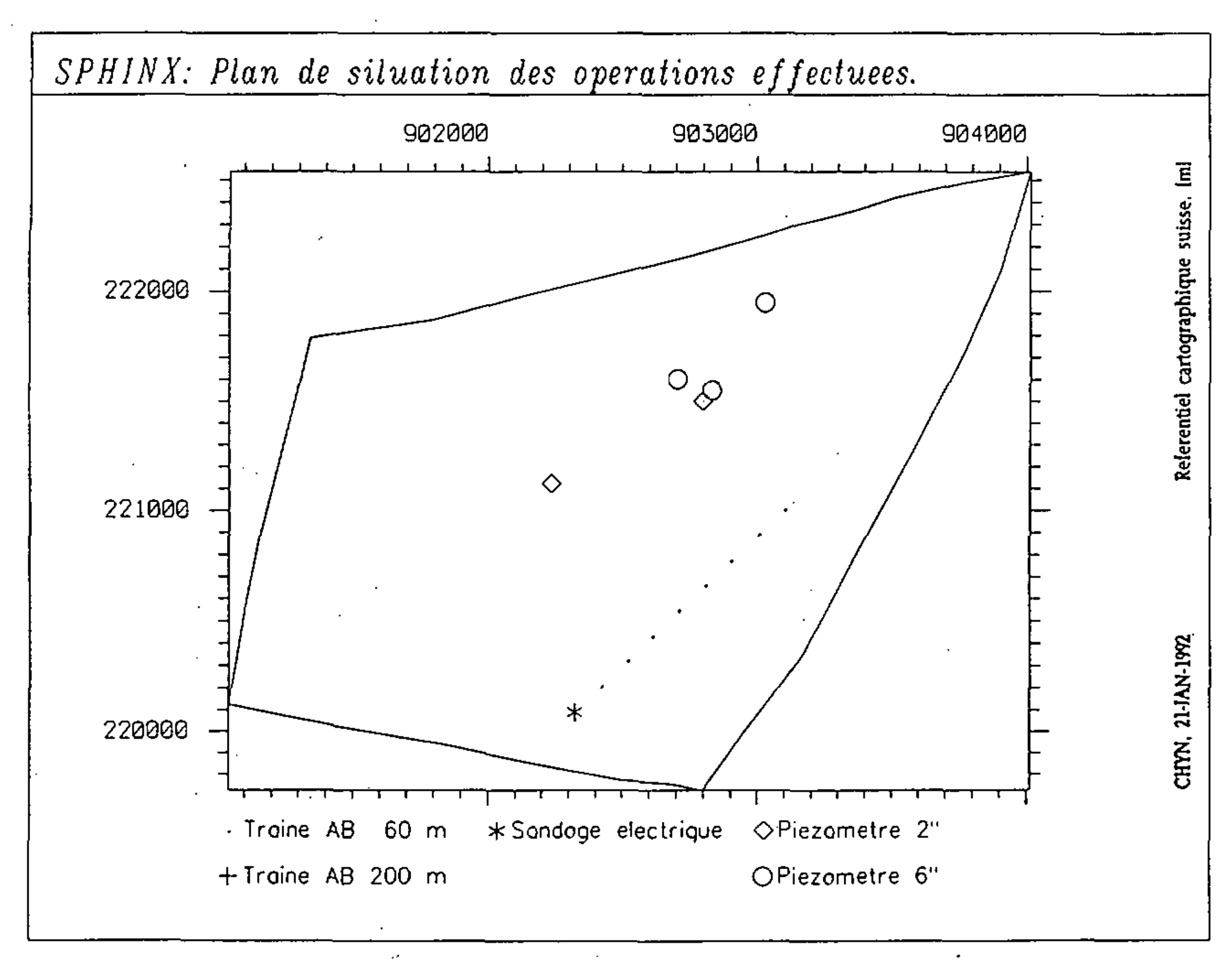


Figure 3.23 Exemple de carte des opérations effectuées.

- Tracé de logs de forage

Les modèles de forages carottés peuvent être présentés sous forme graphique. Le programme reporte les informations obtenues concernant le champ Nature pétrographique & faciès ainsi que le niveau d'eau dans le forage. Cette utilitaire facilite le travail de l'utilisateur, notamment pour les essais de perméamètre à charge variable et pour l'interprétation d'un essai de flowmètre.

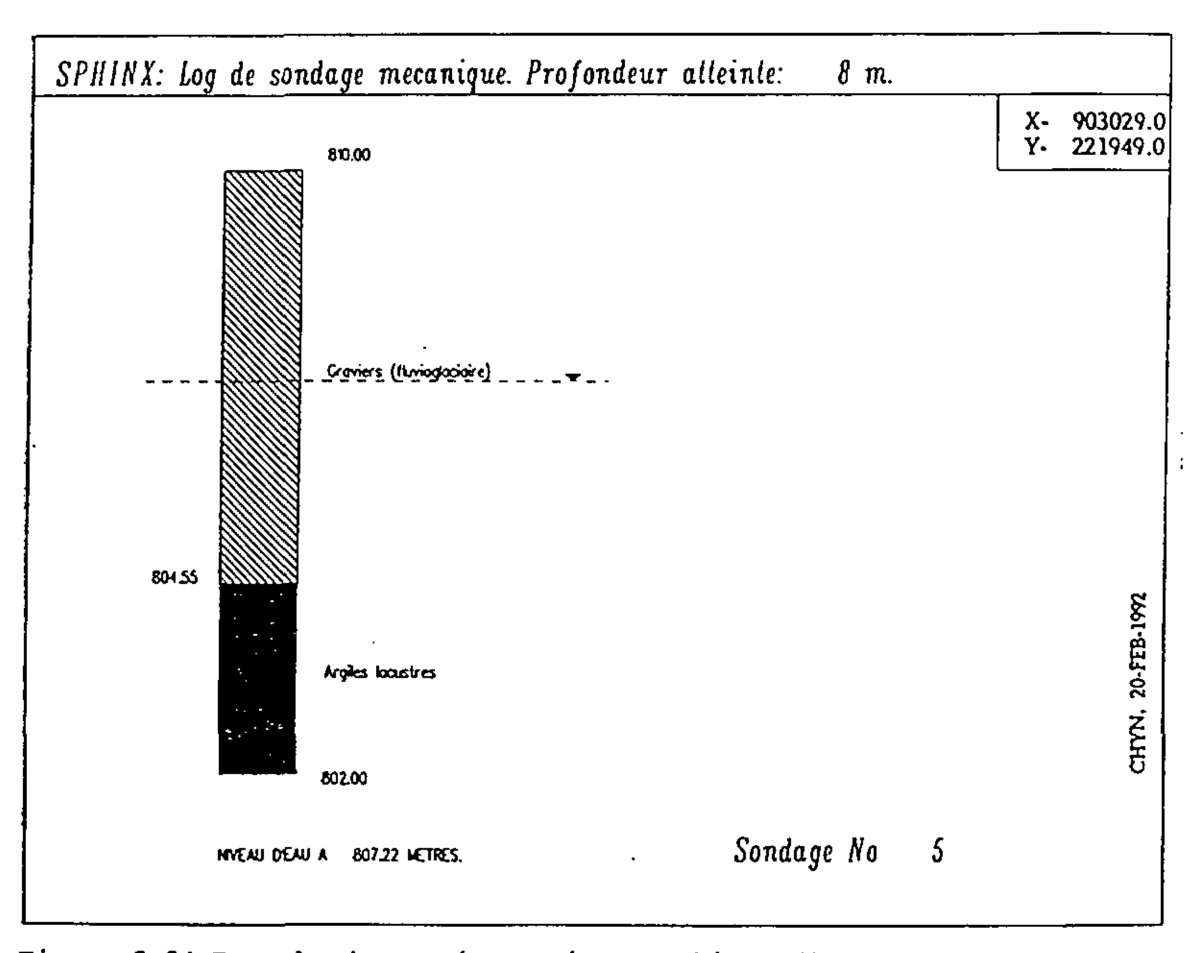


Figure 3.24 Exemple de représentation graphique d'un log de forage.

- Interprétation graphique de sondages électriques

L'utilisateur peut demander au logiciel de relire un fichier résultat de sondage électrique et de le dessiner sur un graphique AB/2 / Rho app. Il peut ensuite superposer une courbe résultant de résistivités vraies et d'épaisseurs introduites interactivement. L'interprétation idéale correspond à la superposition des courbes:

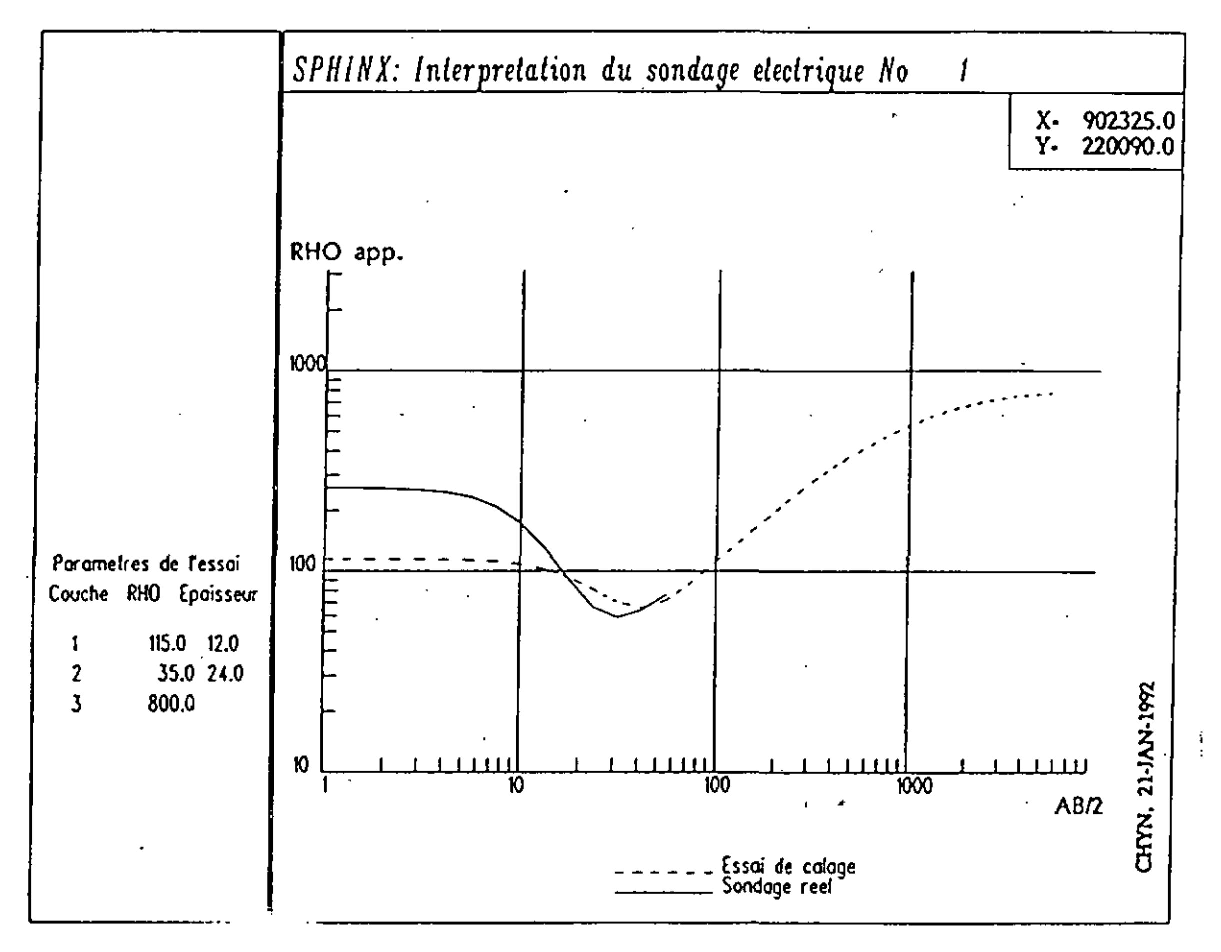


Figure 3.25 *Utilitaire d'interprétation graphique de sondage électrique.*

Les paramètres du calage sont sauvegardés et mis à jour à chaque essai.

- Les autres utilitaires concernent la visualisation et l'impression des fichiers.

3.4 Données du problème

Au début de la prospection, l'utilisateur dispose des éléments suivants, tous stockés et accessibles dans l'ordinateur:

- Une bibliographie (cf annexe 5), spécifique à la région représentée par le domaine réaliste. C'est une simplification de la bibliographie concernant le système réel, dans la mesure où le modèle est une simplification de ce système. L'opérateur ne doit pas y mentionner de fait ou d'observation que le modèle ne représente pas, sous peine de dérouter ou de fausser le raisonnement de l'utilisateur.
- Carte topographique (cf § 3.3.1)
- Carte géologique (cf § 3.3.2)
- Données climatiques, sous forme d'un graphe de température et de pluviométrie pour l'année en cours.

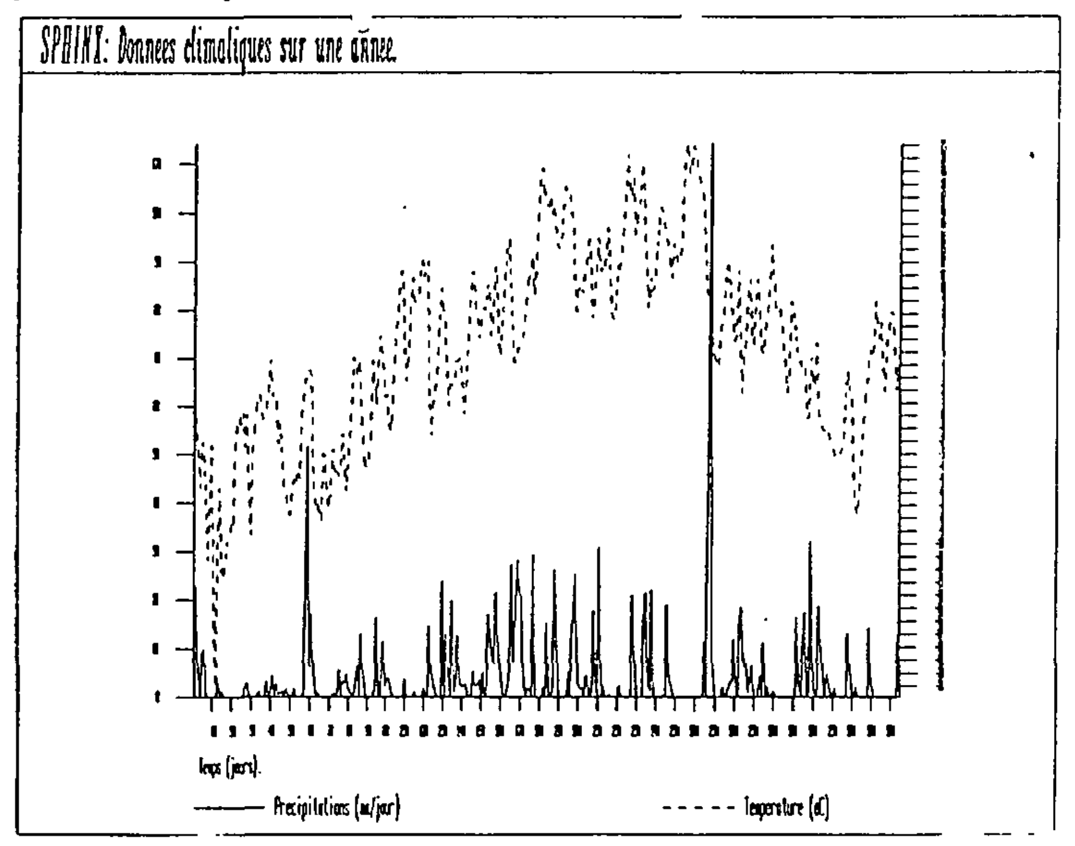


Figure 3.26 Données climatiques. (La Fretaz (VD),1987, station représentative du climat moyen dans le Jura). La représentation graphique est soutenue par le logiciel.

3.5 But du prospecteur

L'utilisateur peut consulter le message suivant:

Le but est de trouver dans le domaine réaliste un point (x,y) où imposer un Débit de 10'000 [m^3/jour], sans provoquer un rabattement supérieur à 0.8 [m], ni en ce point ni en d'autres. La distance de ce point au lieu d'exploitation (X = 903'000, Y = 220'500) doit être inférieure à 1'500 [m]. Le champ des vitesses reelles doit permettre de prevoir qu'une pollution provenant de la zone urbaine ne gagnera pas (x,y) en moins de 10 jours.

3.6 Déroulement de la prospection

Muni de données initiales, d'un but et de moyens pour y parvenir (outils ou modèles), l'élève peut commencer à travailler.

La démarche est la suivante:
- Prendre connaissance des données à disposition, du but à atteindre et de la liste des outils à disposition.
- En fonction de ces éléments, établir une offre détaillée, la soumettre au logiciel, qui l'examine. Si l'offre est acceptable, elle est validée et devient alors le budget de l'élève. Sinon, il faut la modifier.
- Dépenser le budget pour atteindre le but. Les outils faisant l'objet d'une facturation ne sont plus disponibles quand le budget ne le permet plus.
- L'exercice est terminé lorsque l'élève choisit l'endroit du captage définitif (cas favorable), ou quand le budget est épuisé. Il peut alors présenter son travail à un expert, muni de son offre initiale, du détail des dépenses qu'il a fait, de l'historique des manipulations ainsi que des résultats de celles-ci. Tous ces éléments sont stockés par le logiciel.

3.6.1 Aspect budgétaire

Tant que l'offre n'est pas validée, l'accès aux "modèles payant" est interdit. Les rubriques de l'offre sont prédéfinies, de sorte que l'utilisateur doit seulement, pour chacune d'elles, indiquer un montant. Il n'est pas obligé de tout remplir en une seule fois; le logiciel stocke de manière transparente l'état du devis à tout instant et le propose comme état initial lors d'une session ultérieure.

On donne ci-dessous, un exemple d'offre, une fois validée:

Nom: GEHTACH

1	Bibliographie & reconnaissance	:	1000.	$
2	Traines electriques	:	4200.	$
3	Sondages electriques	:	2250.	$
4	Piezometres 2"	:	7600.	$
5	Piezometres 6"	:	16000.	$
6	Essais de pompage	:	5000.	$
7	Essais de flowmetre	:	3000.	$
8	Outil Vitesse reelle	:	7890.	$
9	Redaction du rapport	:	3456.	$
10	Divers et imprevus	:	4520.	$

-----> DEVIS VALIDE <----- Acceptation le 18-JAN-1992 18:37

L'unité monétaire est le US $; le montant total optimum est de 52'500 $. Pour que le devis soit acceptable, la proposition de l'utilisateur pour chaque rubrique doit être:

1	Bibliographie & reconnaissance	:	1000.	± 15 %	$
2	Traines electriques	:	4000.	± 15 %	$
3	Sondages electriques	:	2000.	± 15 %	$
4	Piezometres 2"	:	7500.	± 15 %	$
5	Piezometres 6"	:	15000.	± 15 %	$
6	Essais de pompage	:	5000.	± 15 %	$
7	Essais de flowmetre	:	3000.	± 15 %	$
8	Outil Vitesse reelle	:	7000.	± 15 %	$
9	Redaction du rapport	:	3500.	± 15 %	$
10	Divers et imprevus	:	4500.	± 15 %	$

Il n'y a validation que sur proposition du logiciel et confirmation du participant. Dés lors, l'offre n'est plus modifiable et le logiciel retient le total de l'offre comme étant le budget global et définitif de l'utilisateur. Celui-ci peut donc, par la suite, s'écarter du montant prévu pour chaque rubrique, mais pas dépasser ce total. Le budget, en début d'exercice est de la forme:

Nom: GEHTACH
Date de mise a jour: 18-JAN-1992 18:37
Montant total du devis : 54916

		Nbre	Prixunit.	Total
Traines electriques (par station)	:	0	50	0
Sondages electriques effectues	:	0	200	0
Metres de sondage par battage 2"	:	0	110	0
Metres de sondage carot. 6" (non surv.)	:	0	240	0
Metres de sondage carot. 6" (surv.)	:	0	310	0
Metres de sondage destr. 6" (non surv.)	:	0	200	0
Essais de pompage (forfait)	:	0	1000	0
Tournees piezometriques (par piezo.)	:	0	20	0
Outil Vitesse relle	:	0	30	0
Utilisation du flowmetre	:	0	1500	0

			TOTAL:	0
			SOLDE:	54916

3.6.2 Contrôle de l'efficacité de la démarche

Etant donné que l'enjeu économique réel de l'exercice est nul, l'utilisateur peut adopter sans conséquence une démarche mauvaise. Dans ces conditions, l'apport de l'exercice à son expérience est faible. L'historique des manipulations, et donc l'expert à qui il est présenté, est le moyen le plus efficace pour guider ou critiquer l'action du participant. Cependant, afin d'augmenter l'autonomie du logiciel, il importe que ce dernier puisse dans une certaine mesure remplacer l'expert. Ce chapitre a donc pour objet d'examiner les possibilités de concevoir, dans SPHINX, un système tendant à vérifier que l'élève utilise raisonnablement les outils et le budget dont il dispose.

Deux objectifs peuvent être poursuivis par un tel système:
- Donner des conseils à l'utilisateur; dans ce cas le système doit rechercher à tout instant l'action optimum qu'il convient d'engager, en utilisant notamment le résultat des manipulations précédentes.
- Empêcher que des erreurs soient commises. Il s'agit alors de vérifier que l'action proposée vérifie un certain nombre de contraintes.

Les méthodes de contrôle envisagées présentent un point commun: plus elles sont sophistiquées et performantes, plus elles sont spécifiques au contexte naturel représenté par les modèles. Leur efficacité se mesure à leur "non-transportabilité". Du fait qu'il n'existe pas en hydrogéologie de loi à la fois générale et précise pour guider la prospection, un choix doit être fait:
- Soit l'expertise est assez "fine" et supplée largement le rôle d'une tierce personne. Dans ce cas, le système n'est pas applicable à un autre domaine réaliste. Changer D3 impose de reconstruire le système de

contrôle. Cela nous semble en contradiction avec la modularité du reste du logiciel.
- Soit l'expertise est moins précise. On peut alors conserver le système d'appréciation quand on change D3, moyennant des adaptations minimes.

PRELIMINAIRE

Ce qui suit est specifique a SPHINX; les propriétés utilisées n'ont cours que dans le cadre strict du logiciel. Il s'agit de "quantifier le raisonnement", afin de le rendre reproductible par l'ordinateur.

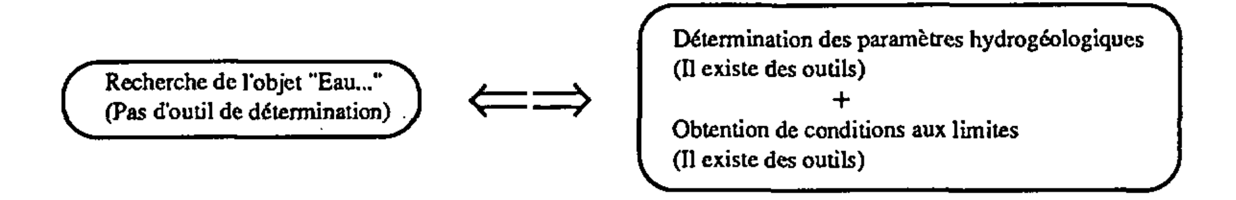
A - NATURE DE CE QUE RECHERCHE LE PARTICIPANT

Il y a de l'eau partout dans D3, mais certains endroits sont meilleurs que d'autres en regard du but poursuivi. Le problème "trouver de l'eau de qualité, en quantité ..." peut donc être ramené à la recherche d'un objet qui se comporte comme une variable.

• Dans le cas d'un modèle purement aléatoire ("aiguille dans une botte de foin"), l'investigation d'un point:
  - Donne un connaissance complète quant au point lui-même (Objet présent ou absent).
  - Ne donne aucun enseignement sur les autres points (même les plus proches), dont le niveau de connaissance est laissé intact.

• En prospection hydrogéologique, c'est exactement l'inverse:
  - La prospection par un outil quelconque renseigne sur le lieu lui-même ainsi que sur l'ensemble de D3.
  - L'application de l'outil renseigne partiellement sur la présence de l'objet:
    Car cet outil ne donne en général que des indices de la présence de l'objet (i.e résistivité vraie).
    Car cet outil correspond a une investigation locale (e.g selon une verticale), alors que l'objet fait appel a une extension latérale.

Il n'existe pas de méthode permettant la découverte directe de cet objet. On doit redéfinir le but en raisonnant de la façon suivante:
Les caractéristiques physiques de l'eau sont connues.
Le comportement de l'eau vis à vis de la matrice rocheuse est connu (On se situe dans le domaine d'application de la loi de Darcy).
La connaissance de la manière dont l'eau circule dans le sous-sol vaut donc exactement la connaissance des paramètres hydrogéologiques de ce sous-sol. (Si on connait parfaitement les paramètres hydrogéologiques en tout point, alors on connait parfaitement le système de circulation parce qu'aucune inconnue n'est liée aux paramètres décrivant l'eau elle-même, ni aux lois qui décrivent son comportement). Trouver l'objet revient donc à connaître la circulation de l'eau souterraine, c'est-à-dire connaître la distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques ainsi que les conditions de potentiel ou de débit aux limites du domaine.
Il est ainsi légitime d'établir une équivalence entre le but initial (recherche d'un objet) et le but tel qu'il est redéfini ci-dessus.



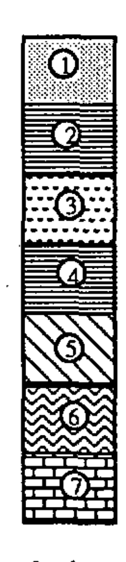
B - ON PEUT UTILISER LES PARAMETRES GEOLOGIQUES, GEOPHYSIQUES, ETC

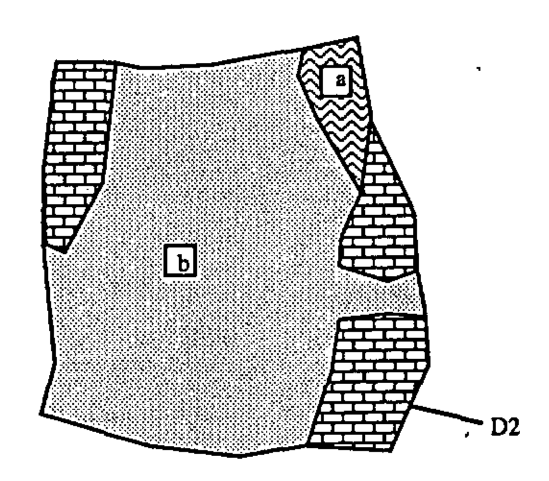
Par ailleurs, bien que la structure géologique soit sans rapport conceptuel avec le but poursuivi (Détermination spatiale des paramètres hydrogéologiques), il existe un rapport de fait puisque la distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques est liée à celle des différentes formations rocheuses. C'est par ce biais que la géologie intervient en prospection hydrogéologique et que le prospecteur utilise les règles de la genèse des formations rocheuses comme valides sous l'aspect de la distribution spatiale des paramètres agissant sur la circulation de l'eau.

C - COMMENT QUANTIFIER LA STRUCTURE GEOLOGIQUE

On utilise ici les propriétés des champs Age et Nature pétrographique & faciès (cf § 3.2.3 et § 3.2.4):

A la verticale de chaque point de D2, il y a un empilement de niveaux géologiques. Cet empilement est inconnu, mais en (x,y) le prospecteur sait:
- les niveaux qu'il peut y avoir dessous,
- les niveaux qu'il y a certainement dessous,
- les niveaux qu'il n'y a certainement pas dessous.





La difficulté est double:
- Les niveaux ont des épaisseurs variables (minimum = 0)
- Certaines couches existent dans D3 mais sont invisibles sur D2.

Dans l'exemple ci-dessus:
- Au point a, il ne peut y avoir que 7, surmonté de 6.
- Au point b, les niveaux 2 à 7 peuvent exister sous 1. Or il n'y a pas d'indice de la présence de 2, 3, 4 et 5 dans D2. Ces niveaux doivent être supposés.

Considérons que l'activité du géologue consiste à préciser en tout (x,y) l'allure de la CSTM, c'est à dire déterminer l'épaisseur de chaque niveau.

Construction de la CSTM.

Elle comporte tous les niveaux connus ou inconnus susceptibles d'être rencontrés au moins à 1 (x,y,z) de D3. L'épaisseur de chaque niveau est établie:
- par hypothèse pour les niveaux n'affleurant pas.
- par hypothèse, observation, étude cartographique ou bibliographie pour les niveaux affleurant.

Du fait que cette colonne est valable pour l'ensemble de D3, la colonne stratigraphique réelle (CSR) au droit de tout (x,y) de D2 est une transformation géométrique de la CSTM, définie par le vecteur des cotes des interfaces entre niveaux et donc une variable régionalisée de la CSTM sur D2. Il en va de même pour la connaissance que l'on a de la CSR. Par exemple, la carte géologique permet la troncature en tout (x,y) de la partie allant du sommet de la CSTM jusqu'au niveau affleurant, ce dernier étant conservé.

Par ailleurs, remarquons que chaque outil est caractérisé par:
- Le point de surface (x,y) de son application.
- Le/les paramètre(s) qu'il tend à déterminer.
- La profondeur d'investigation, qui suffit à décrire l'extension verticale de la manipulation, puisqu'il n'existe pas dans SPHINX d'outil permettant d'investiguer la cote z sans investiguer toutes les cotes allant de la surface jusqu'à z. (Dans les systèmes réels, seule la spéléologie pourrait faire exception).
- Les autres outils devant être utilisés auparavant pour permettre son application. (i.e forage pour essai de pompage).

RESUME:
- Trouver l'objet "Eau de qualité..." revient à déterminer le champ des paramètres hydrogéologiques, ainsi qu'un nombre maximum de conditions aux limites concernant la circulation des eaux. La validité de ceci est établie en considérant qu'il n'y a aucune inconnue sur les paramètres physiques de l'eau, ni sur son comportement dans le milieu si celui-ci est connu.
- Déterminer le champ des paramètres hydrogéologiques revient à connaître la structure géologique ainsi que la valeur des paramètres hydrogéologiques associés à chaque formation. L'utilisateur sait qu'à un

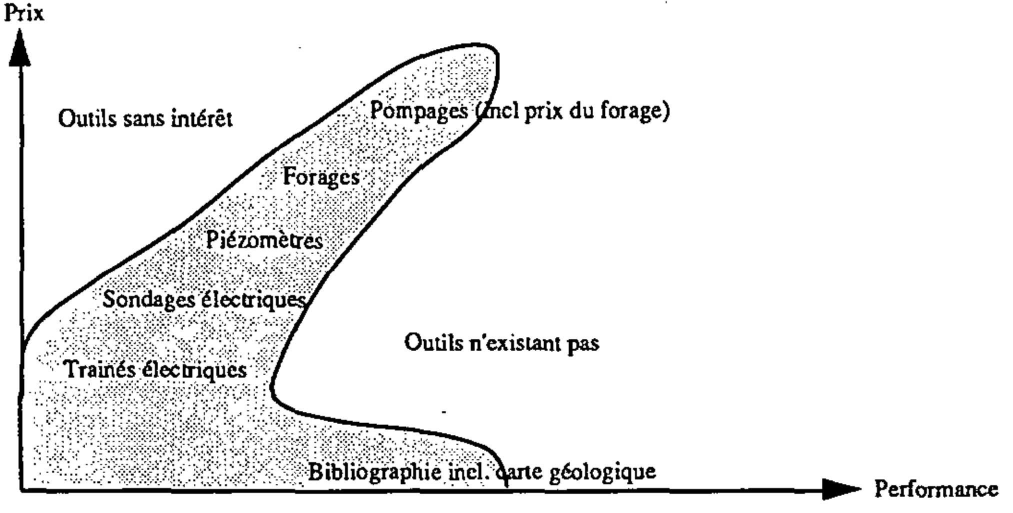
faciès donné correspond de manière injective une famille de paramètres hydrogéologiques.
- Cette dernière équivalence autorise l'emploi d'outils révélant la structure et la nature géologique sans apporter d'information directe sur les paramètres hydrogéologiques.

Remarque: Une prospection optimum consisterait en l'emploi en tout point de D2, de l'outil permettant l'appréciation directe de la présence de l'objet recherché.
- Cet outil n'existe pas, le plus ressemblant étant le forage avec essai de pompage de longue durée.
- Le budget limité oblige en outre le prospecteur à ne pas utiliser un modèle purement aléatoire et à remplacer l'essai systématique par le raisonnement.

L'utilisation de chaque outil correspond à un risque budgétaire double:
- Soit l'outil n'apporte pas d'information nouvelle et il y a alors redondance d'information.
- Soit le résultat de son application est décevant du point de vue de la recherche de l'objet. (Roches peu perméables, zone saturée peu épaisse...)

Par conséquent, on procède avec prudence, en établissant pour chaque (x,y) de D2 une péréquation liant la connaissance que l'on a de la CSR, l'intérêt que présente cet état et le risque d'erreur admissible.

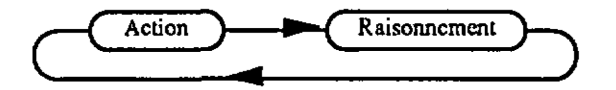
Appelons performance d'un outil son aptitude à renseigner directement ou indirectement de manière univoque sur les paramètres hydrogéologiques et/ou sur les conditions aux limites de la quantité extensive transportée. Affirmons ensuite que, dans SPHINX, les outils les moins chers sont schématiquement les moins performants:



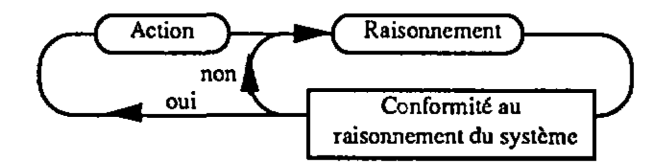
La bibliographie échappe à la règle mais présente un caractère systématique (Point de départ inévitable).

La prudence se traduit par une préséance dans l'ordre des manipulations: On applique d'abord les outils les moins chers (les moins performants), ce qui revient à dire qu'on peut globalement calquer l'ordre des manipulations sur l'échelle des prix.

Ces remarques permettent de formuler quelques approches possibles pour un système de contrôle des actions engagées par le participant, en remarquant que si le cycle de la prospection réelle est schématiquement:

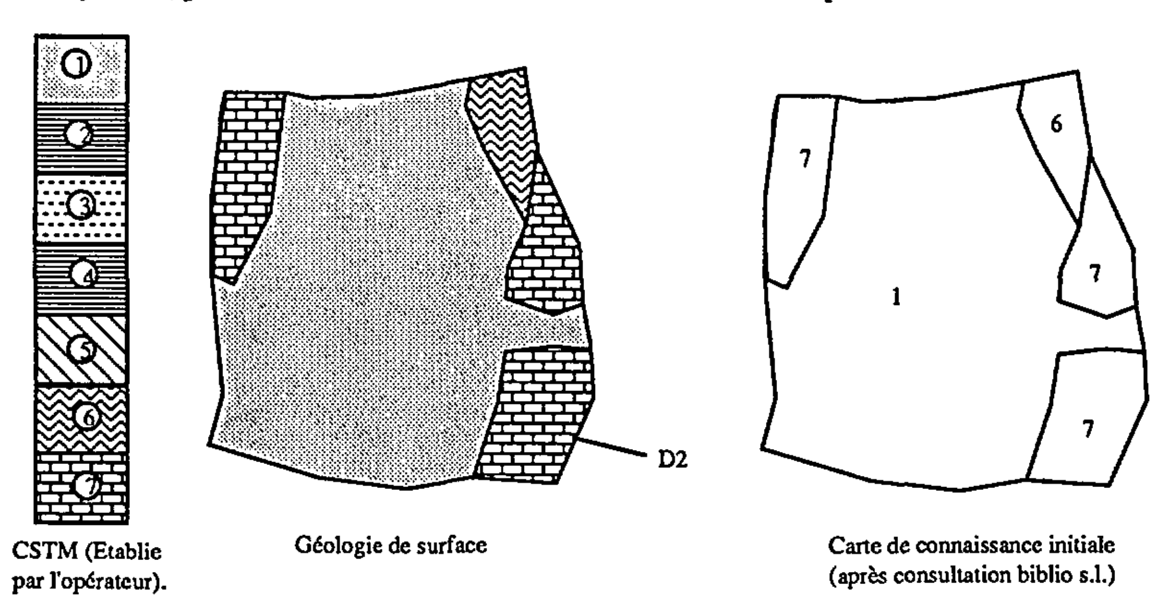


celui de la prospection simulée sous contrôle d'un système d'appréciation s'écrit:



Approche systématique, sans considération du contexte, sans contrainte budgétaire.

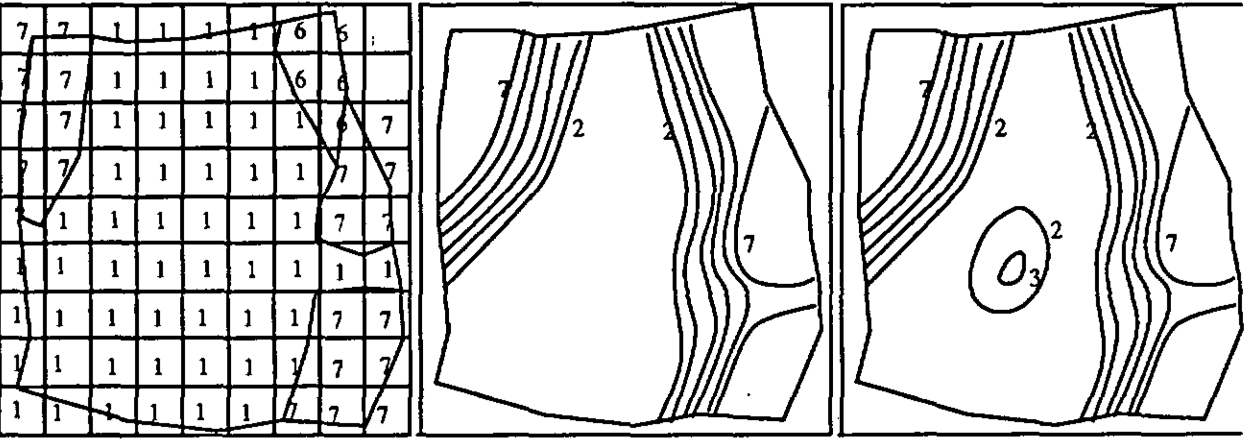
Dans ce cas, le système vérifie que la CSR est connue jusqu'à sa base, de façon homogène sur D2. La CSTM est construite à priori par l'opérateur. On définit un coefficient de connaissance (CC) qui vaut initialement en chaque (x,y) le numéro du niveau affleurant en ce point.



CSTM (Etablie par l'opérateur). — Géologie de surface — Carte de connaissance initiale (après consultation biblio s.l.)

Chaque manipulation met à jour la valeur de CC au prorata du nombre de niveaux investigués. CC augmente de 1 chaque fois que le toit d'un niveau de la CSTM est précisé dans la CSR.

Le système vérifie que la densité des manipulations n'est ni trop petite ni trop élevée, par interpolation et calcul d'ecart-type de CC. Il peut en outre s'assurer que les opérations sont effectuées en respectant une préséance établie à priori (geoélectricité, piézomètres, forages, etc...).



Maillage initial permettant une interpolation du CC

Carte initiale interpolée du CC

Par la suite, chaque manipulation modifi la carte du CC. Ici le niveau 3 de la CSTM a été touché.

La prospection est terminée quand CC vaut en tout point le nombre de niveaux de la CSTM (ici 7).

Critique de la méthode

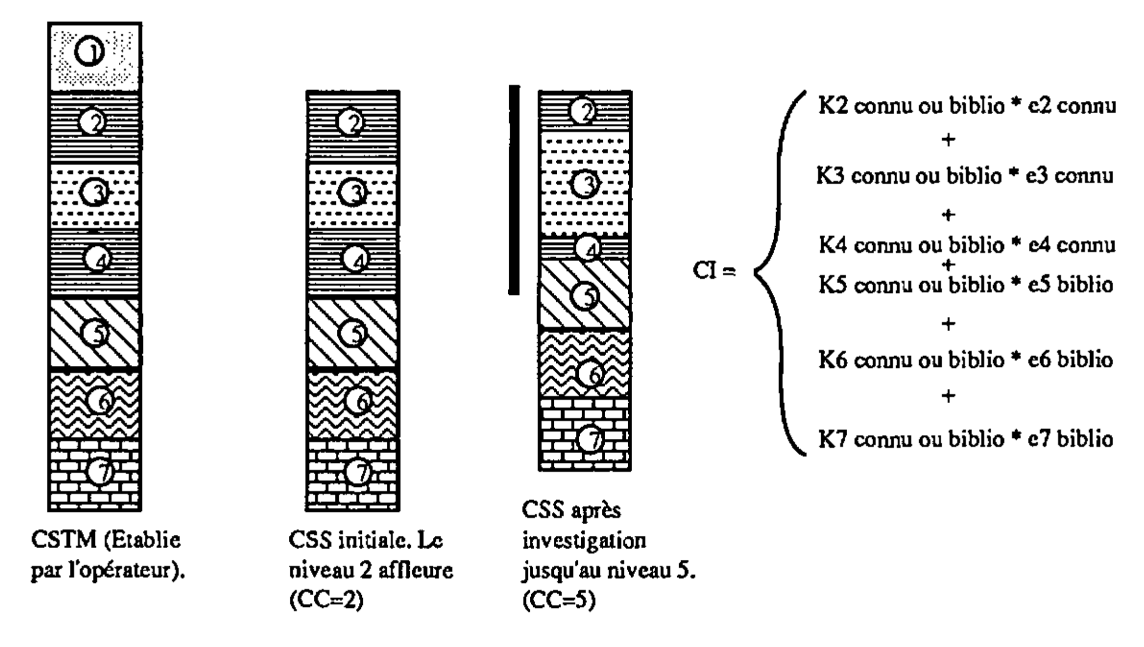
- Cette approche utilise la notion de connaissance (quantifiable), mais pas celle d'intérêt; le système sera donc amené à conseiller un investissement aussi là où il n'y a manifestement pas de ressources.
- Si une méthode est inopérante en raison du contexte naturel, le système n'est pas en mesure de le remarquer.
- Pour atteindre le but, il faut un budget illimité. Si ce n'est pas le cas, la prospection a peu de chances d'aboutir.
- Si le but est atteint en cours de prospection, le système n'est pas capable de suggérer l'interruption des travaux.
- Il faut entretenir une carte de connaissance aussi pour les conditions aux limites du modèle hydrodynamique (piézomètres).
- La notion d'extension latérale ("validité latérale" d'une manipulation) intervient par le biais de la méthode d'interpolation de CC choisie. Cette interpolation est numérique et ne fait intervenir aucun critère géologique. Il faudrait modifier la méthode d'interpolation selon l'endroit de D2 et selon D2 lui-même. Une possibilité est de pondérer le coefficient de lissage par une fonction simple du numéro du niveau de surface: Sous 1 lissage faible, sous 7 lissage important; ainsi, plus il y a de niveaux pouvant se trouver sous (x,y) de D2, plus la variabilité de la structure est grande. On pourrait, de plus, associer à chaque niveau une variabilité latérale qui lui est propre.

L'introduction de tels coefficients est gênante, sujette à discussion et interdit d'imaginer un programme où l'on puisse changer facilement le domaine réaliste.

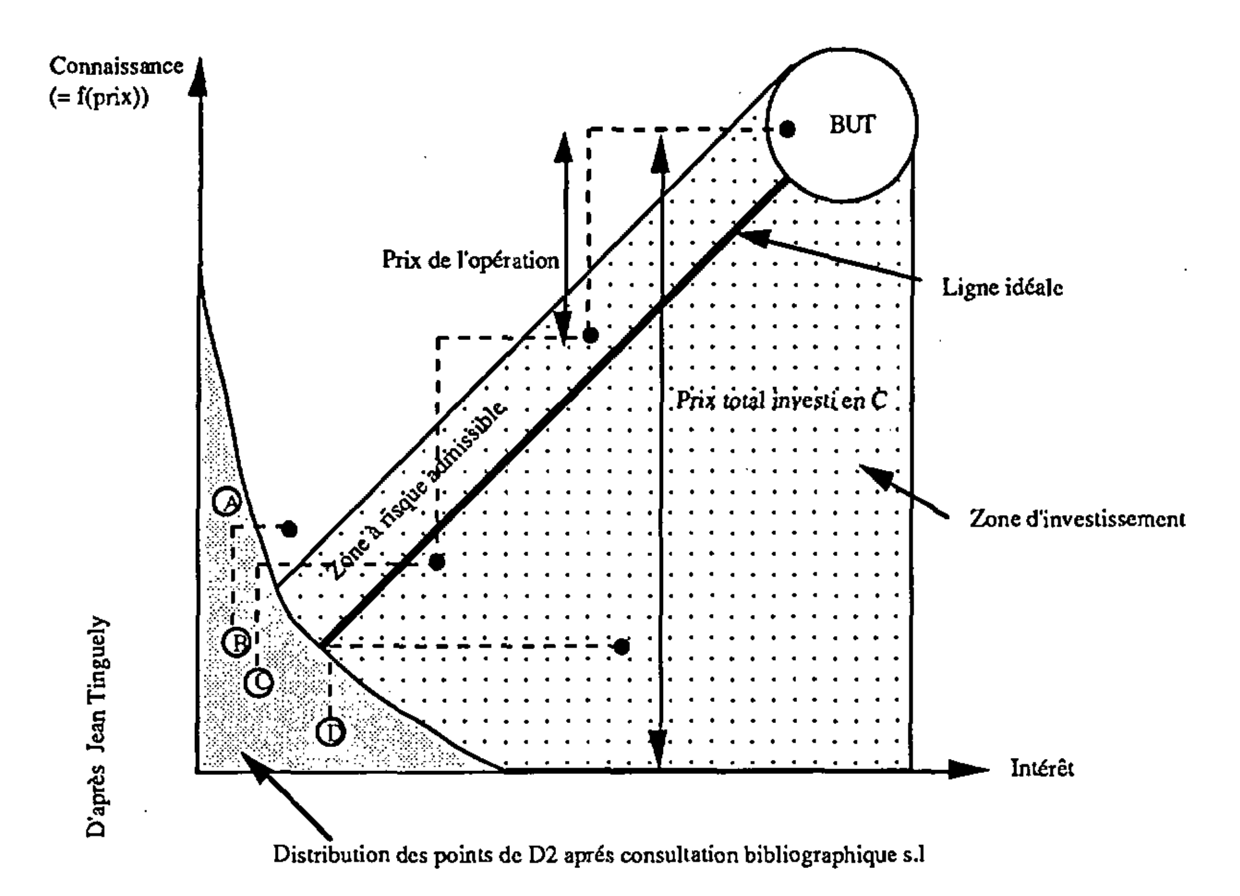
Approche faisant intervenir l'intérêt porté à chaque point.

De nouveau, la connaissance en chaque (x,y) de D2 est estimée par le nombre de niveaux de la CSTM dont la cote du toit est connue.
Définissons l'intérêt CI en (x,y) comme la transmissivité de la colonne stratigraphique supposée (CSS) en ce point. Par ce biais, on ramène de nouveau à D2 et sous forme d'une quantité une notion faisant intervenir l'ensemble de D3.

Le calcul de CI est effectué par:
- la somme de $K_{connu\ ou\ bibliographique} * e_{connu}$ allant de la surface jusqu'à la profondeur maximum investiguée, plus
- la somme de $K_{connu\ ou\ bibliographique} * e_{bibliographique}$ en dessous.



En procédant ainsi, on donne le même "poids" aux connaissances acquises qu'à ce qui est hypothétique. Il est donc souhaitable de pondérer la part de CI provenant de la CSTM. De plus, il convient d'abaisser le poids de la contribution des niveaux profonds pour représenter le fait qu'on s'intéresse d'abord aux ressources proches de la surface.
En considérant D2 comme un ensemble de points, on peut représenter le déroulement de la prospection comme l'évolution de ces points sur un graphe liant la connaissance que l'on a de chaque point et l'intérêt que présente ce point quant à l'objet recherché:



Distribution des points de D2 aprés consultation bibliographique s.l

Le but à atteindre est la détermination du point (x,y) présentant un intérêt élevé. Comme on ne s'en remet pas au hasard, il importe que la connaissance de la CSR en ce point soit également élevée. En outre, l'intérêt ne peut pas être grand si la connaissance ne l'est pas.

Choisissons arbitrairement la loi idéale pour parvenir au but: Connaissance = Intérêt. Le cheminement de quelques points de D2 illustre le déroulement de la prospection ainsi contrôlée:

A - Après consultation bibliographique (y compris carte géologique), l'intérêt est petit et la connaissance élevée. Il peut donc s'agir d'un affleurement du substratum. Ce point étant hors de la zone d'investissement, on ne modifiera plus la connaissance le concernant.

B - La position initiale est dans la zone d'investissement. On choisit donc d'appliquer en **B** un outil et on constate alors que l'intérêt a légèrement augmenté, mais pas suffisamment pour ramener **B** dans la zone d'investissement. Le cheminement de **B** est terminé.

C - Chaque outil (de plus en plus chers) appliqué en **C** a augmenté l'intérêt de manière à maintenir le point dans la zone d'investissement. A l'issue de l'application du deuxième outil, le point se trouvait dans la zone à risque admissible, c'est à dire au dessus de la ligne idéale. Dans cette zone, les points présentent un intérêt faible en regard de la connaissance que l'on en a, mais on s'autorise à dépenser encore de

l'argent en espérant que l'intérêt augmentera encore. Finalement, il sera possible d'installer un ouvrage de captage en C.

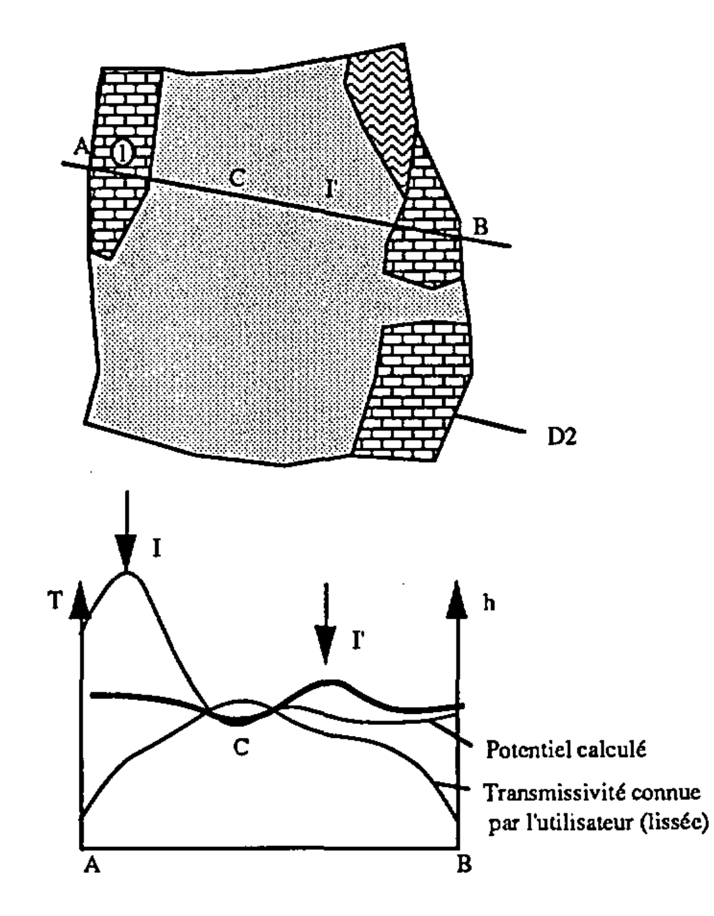
D - Le cheminement de **D** est incomplet. La connaissance est restée petite relativement à l'intérêt que présente **D**. Puisque le but a déjà été atteint en **C**, il est inutile de continuer a dépenser de l'argent.

Critique de la méthode

- Cette approche utilise la notion de connaissance (quantifiable) et celle d'intérêt (quantifiable). On peut donc espérer fabriquer un système vérifiant une bonne gestion du budget. Cependant, la ligne idéale étant arbitraire, il faut utiliser des coefficients lors du calcul de CC et de CI. Concernant CC, de tels coefficients ne dépendent pas seulement de l'outil, mais du milieu auquel ils s'appliquent. Par exemple, un trainé électrique ne peut pas élever CC de la même quantité si des graviers ou de la moraine affleurent et on ne peut pas faire remarquer à l'utilisateur que la profondeur d'investigation de la manipulation est insuffisante pour espérer toucher un niveau aquifère. Cela signifie qu'il est impossible, par cette approche, de fixer des coefficients demeurant valides quelque soit le domaine investigué.
- Si une méthode est inopérante en raison du contexte naturel, le système n'est pas en mesure de le remarquer.
- Si le but est atteint en cours de prospection, le système est capable de suggérer l'interruption des travaux en détectant qu'un point se trouve à proximité du but idéal.
- Il faut intégrer les conditions aux limites dans le calcul de CC et de CI.
- La notion d'extension latérale ("validité latérale" d'une manipulation) n'intervient pas. On peut tout au plus faire migrer les voisins immédiats d'un point en utilisant de nouveau des coefficients dépendant du milieu.

Approche faisant intervenir l'intérêt porté à chaque point avec interpolation physiquement raisonnable.

PRINCIPE: On injecte le montant (pondéré) de l'opération prévue dans le modèle numérique de la carte des transmissivités connues. Si le potentiel augmente fortement en regard du débit imposé, l'opération est déconseillée.



Vue en coupe selon AB

L'état initial de la distribution spatiale des transmissivités est fourni par la CSTM tronquée au niveau affleurant. Le profil des transmissivités a ensuite été modifié en C par une manipulation quelconque.
En injectant en I un débit fonction du prix de l'opération envisagée, on constate une forte élévation du potentiel hydraulique. L'opération est donc déconseillée. En I', elle aurait été autorisée.

Pour faire respecter la préseance des manipulations, l'historique des opérations est reporté sur une carte d'alimentation distribuée. On peut alors détecter et déconseiller une injection brutale.

Pour donner un conseil (tel prix en tel endroit), il suffirait de calculer avec toutes les alimentations distribuées déjà investies et de chercher le point de plus bas potentiel.

On se base sur les transmissivités connues ou supposées pour estimer le bien-fondé d'une action. En utilisant les transmissivités vraies (connues du programme), on pourrait déconseiller une action à priori justifiée, valide pour un état de connaissance donné.

Critique de la méthode

Cette méthode présente l'avantage de ne pas utiliser de coefficients pour l'interpolation de CC ou CI et elle tient compte de l'ensemble du domaine. La loi d'interpolation vaut la loi physique (Darcy), ce qui est idéal. CC est ici représenté par le débit injecté (alimentation distribuée) et CI par l'inverse de l'augmentation de potentiel sur tout le domaine.
- On intègre la notion d'extension latérale, de manière optimum et sans coefficients. Cela permet de tenir compte, par exemple, de l'effet d'une lentille perméable dans une matrice peu perméable. Dans ce cas, l'approche précédente verrait un endroit favorable à l'exploitation alors qu'ici, le système donnera un avis négatif malgré une transmissivité locale élevée. L'intérêt est donc bien approximé par cette méthode, du point de vue de l'écoulement de l'eau dans le sous-sol. Mais deux difficultés apparaissent:
- Les contraintes techniques, topographiques et budgétaires n'interviennent pas sans un complément au système d'appréciation.

- La transmisaivité calculée doit être celle de la zone saturée: Comment interpoler entre les points d'ancrage de la surface piézométrique connue?
- Par contre, des coefficients demeurent nécessaires pour convertir CC (Prix) en débit. Ces coefficients dépendent du milieu. Il faut en outre interpoler pour construire à chaque nouvelle manipulation la distribution spatiale des perméabilités connues.
- Si une méthode est inopérante en raison du contexte naturel, le système n'est pas en mesure de le remarquer.
- Si le but est atteint en cours de prospection, le système est capable de suggérer l'interruption des travaux en détectant que le potentiel hydraulique en un point est relativement bas tout en étant l'objet d'une alimentation distribuée élevée.
- Comment choisir les conditions aux limites du modèle numérique ?
- Il faut intégrer les conditions aux limites dans le calcul de CC et de CI.
- Le contrôle global du budget peut être effectué en vérifiant, en fin de prospection, qu'une surface plus ou moins équipotentielle couvre D2.

Approche par règles.

Les solutions proposées ci-dessus présentent en commun de décrire la prospection par une loi unique, en définissant une quantité unique pour CC (ev. CI). De telles approches sont conceptuellement valides. Cependant, il faut dans tous les cas introduire un jeu de coefficients qui dépendent du milieu d'investigation, parce que la performance des outils (donc leur apport à la connaissance) dépend de ce milieu. L'ajustement de ces coefficients est un travail délicat et il est difficile de garantir qu'aucun effet néfaste ne se manifeste. En voulant donner à SPHINX la propriété d'interchangeabilité aisée de D3, on doit condamner ce type d'approche.

De plus, la quantité "intérêt" est liée à la transmissivité en (x,y):

$$T(x,y) = T_{connue + bibliographique} = T_{prouvée + hypothétique}.$$

Cette quantité est d'utilisation aisée mais ne permet pas une analyse assez précise de la CSR : Comment indiquer avec une quantité unique qu'il est inutile de faire un sondage électrique à AB court parce qu'il y a un résistant en surface ? Comment vérifier qu'un piézomètre a une chance de toucher l'aquifère ?

On préfèrera une approche par règles. Il s'agit d'un mécanisme moins global, plus lourd dans son principe parce que manipulant plus de variables, mais"solide" dans le sens qu'aucun comportement imprévu du système d'appréciation n'est à redouter.

PRINCIPE: On postule que chaque nouvelle manipulation est à priori judicieuse et on lui demande de vérifier un certain nombre de contraintes. Bien que ces contraintes soient établies séparément pour tout type d'opération, elles s'écrivent schématiquement:

- Apport à la connaissance (Non redondance + validité de l'outil)
- Intérêt du lieu tel qu'il est connu
- Respect de la préséance des opérations
- Equilibre du budget
- Contraintes techniques (Distance au lieu d'exploitation, topographie, exclusion des zones urbaines, etc...)

Chaque outil est couplé à son propre système d'appréciation: Il n'y a pas de système global, pas de loi unique, et le contrôle sur l'ensemble de la prospection est réalisé par l'historique et le budget. Si les notions d'intérêt et de connaissance sont implicitement prises en compte, on ne cherche pas ici à les quantifier. Elles sont traitées spécifiquement, de sorte qu'il est inutile d'établir une fonction les liant. On teste l'intérêt du lieu séparément de l'apport à la connaissance qu'apporte la manipulation prévue.

DONC: Il demeure nécessaire d'introduire des coefficients pour décrire la validité latérale d'une manipulation, mais pas de coefficients liant les manipulations entre elles pour les ramener toutes à la quantité globale CC. De même, à la notion globale d'intérêt, on substitue le détail de la CSR.

Remarque: Cette approche présente en outre l'avantage de permettre l'ajout ou la modification d'un outil sans devoir modifier l'ensemble des coefficients intervenant dans CC, donc de recaler tout le programme.

LISTE DES REGLES

Trainés électriques

- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une distance admissible (1'500 m) fournie par le mandat.
- A une altitude relativement basse (lecture de la courbe des %cumulés des altitudes des nœuds de surface; içi 550 m).
- Ecartement entre stations raisonnable / longueur du trainé => 10 < nombre de stations < 60
- Longueur du trainé raisonnable / distance admissible => >1/20
- Préséance: Aucune clause, car cette manipulation est la première.
- Non redondance: Moins de 20% des points du trainé sont à (distance admissible / 50)de ceux d'un trainé précédent.
- Intérêt: Au moins 80% des stations peuvent toucher un niveau à $K_{biblio} > K_{seuil}$. On procède par consultation de la partie de la CSTM sous le niveau affleurant. La profondeur d'investigation vaut 1/5 de la longueur de ligne. Le message est différent s'il est certain que la partie existante de la CSTM ne contient pas de niveau aquifère. K_{seuil} est calculé par le programme et vaut la perméabilité d'un milieu homogène minimum pour pomper le débit d'exploitation avec un rabattement < 2m.
- Clause spéciale: Le trainé présente un caractère systématique. Toutes les autres opérations sont déconseillées tant que la zone non-urbaine, contenant $K > K_{seuil}$ dans la CSTM, à distance < distance

admissible, à altitude raisonnable, n'est pas couverte par une densité de trainé suffisante (1 station par 1/10x1/10 de la distance admissible). On vérifie que tous les éléments d'un maillage couvrant cette zone contiennent au moins une station.

Sondage electrique
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (1500 m) fournie par le mandat.
- Préséance: La densité de trainé électrique doit vérifier la clause spéciale du paragraphe précédent.
- Non redondance: Pas d'autre sondage ni forage destructif à moins de (1/20 de la distance admissible), dont la profondeur est > à la profondeur d'investigation (AB/5).
- Intérêt: Peut toucher un niveau à $K_{biblio} > K_{seuil}$.

Piézomètre 2".
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (1'500 m).
- Préséance: La densité de trainé électrique doit vérifier la clause spéciale.
- Non redondance: Pas d'autre piézomètre à moins de (1/20 de la distance admissible), sauf si un forage 6" existe dans ce rayon.
- Intérêt: Peut toucher un niveau à $K_{biblio} > K_{seuil}$. La CSTM ne présente pas de niveau dur entre la surface et la profondeur prévue.

Forage 6" carotté, surveillé ou non.
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (1'500 m).
- Préséance: La densité de trainé électrique doitvérifier la clause spéciale. Il doit y avoir un sondage électrique dont la profondeur d'investigation est >= celle du forage prévu à moins de (1/20 de la distance admissible). L'interprétation du sondage électrique doit montrer quelque part une résistivité vraie > 200 ohm.m.
- Non redondance: Pas d'autre forage 6" à moins de (1/20 de la distance admissible), dont la profondeur est > à la profondeur prévue.
- Intérêt: Peut toucher un niveau à $K_{biblio} > K_{seuil}$.

Forage 6" destructif.
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (1'500 m)
- Préséance: La densité de trainé électrique doit vérifier la clause spéciale. Il doit y avoir un sondage électrique dont la profondeur d'investigation est >= celle du forage prévu à moins de (1/20 de la distance admissible)L'interprétation du sondage électrique doit montrer quelque part une résistivité vraie > 200 ohm.m.
- Non redondance: Pas d'autre forage 6" à moins de (1/20 de la distance

admissible), dont la profondeur est > à la profondeur prévue.
- Intérêt: Peut toucher un niveau à $K_{biblio} > K_{seuil}$.

Flowmètre.
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (fournie par le mandat)
- Préséance: Forcément dans un forage 6".
- Non redondance: Pas déjà fait
- Intérêt: Le forage doit permettre de pomper le débit d'exploitation avec un rabattement < 2m. (D'après le log de forage et les K bibliographiques)

Pompage de durée limitée.
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (fournie par le mandat)
- Au moins 2 piézomètres ou forages se trouvent à moins de (1/20 de la distance admissible).
- Non redondance: Pas déjà fait
- Intérêt: Le forage doit permettre de pomper le débit d'exploitation avec un rabattement < 2m. (D'après le log de forage et les K bibliographiques).

Vitesse réelle.
- Non redondance: Pas déjà fait dans ce forage.
L'utilisation de cet outil devrait présenter un caractère systématique; tous les forages sont concernés.

Pompage de longue durée.
- Le forage n'est pas en zone urbaine.
- Sa distance au lieu d'exploitation est inférieure à une constante (fournie par le mandat)
- Préséance: Forcément dans un forage 6". Au moins 2 piézomètres ou forages se trouvent à moins de (1/20 de la distance admissible).
- Non redondance: Pas déjà fait
- Intérêt: Le forage doit permettre de pomper le débit d'exploitation avec un rabattement < 2m. (D'après le log de forage et les K bibliographiques ou les résultats d'un pompage de durée limitée au même endroit).

Ces règles supposent que le niveau phréatique est proche de la surface, relativement à la profondeur d'investigation usuelle des outils.
Pour l'utilisateur, la consultation de ce que nous avons appelé "l'œil du maitre" est optionnelle et non facturée. C'est une rubrique sêparée des autres dans le logiciel.

Chapitre IV

Installation de la configuration dans l'ordinateur

4.1 Généralités sur le logiciel.

En raison de l'importance des calculs, SPHINX est installé sur un ordinateur VAX 8530 du département de calcul de l'Université de Neuchâtel. Les procédures de communication sont rédigées en langage DCL pour système VMS de DEC, les programmes en Vax Fortran 77.

Les contraintes suivantes ont guidé sa réalisation:

- Transportabilité. L'ensemble des programmes et procédures peut être installé sur une autre machine VAX, moyennant la redéfinition de quelques noms logiques.

- Autonomie: La seule librairie externe nécessaire est PLOT 10/GKS; le mode graphique est TEKTRONIX 4014.

- Modularité: Chaque programme est une entité, modifiable ou interchangeable sans conséquence sur le reste du logiciel.

- Cohérence: Les variables, dimensions, vecteurs et paramètres Fortran sont contenus dans un fichier externe, inclus dans chaque programme et sous programme. On réduit ainsi les risques d'erreur de programmation.
La contrepartie est une consommation importante en mémoire centrale.
Par ailleurs, tous les formats de lecture et d'ecriture sur les unités physiques sont stockés dans une routine séparée. L'appel de cette routine pour les opérations d'entrée/sortie garantit notamment qu'un programme peut relire sans erreur un fichier créé par une autre partie du logiciel.
Une librairie interne permet d'augmenter la cohérence et la compacité de l'ensemble.

Le programme communique avec l'utilisateur en langue française. Les formats Fortran contenant les messages étant réunis dans une routine unique (EDITION.FOR), une traduction éventuelle est favorisée. Le texte est non accentué afin d'éviter les effets indésirables sur les environnements fonctionnant en mode 7 bits.

Chaque utilisateur doit posséder un directory. Le logiciel y crée un sous-directory et y stocke les fichiers produits par le fonctionnement. Les directories des différents utilisateurs doivent résider sur le même disque. Toutes les opérations sont transparentes, les résultats de manipulations sont accessibles depuis le logiciel; aucune connaissance du système d'exploitation n'est nécessaire pour utiliser SPHINX. Les noms de fichiers sont choisis automatiquement, parfois sur la base d'un numéro donné par l'utilisateur.

Le nombre d'utilisateurs simultanés est illimité.

L'opérateur possède un directory où est stocké le logiciel, qui n'est pas nécessairement sur le même disque que celui des utilisateurs.

4.1.1 Structure de la mémoire de masse

Les procédures, programmes et fichiers, permanents ou temporaires, tant pour l'utilisateur que pour l'opérateur sont placés sur des unités désignées par des noms logiques. Dans tout ce qui suit, le terme 'participant' désigne le directory principal d'un utilisateur donné.

Unités physiques nécessaires et noms logiques correspondant:

Unités physiques	Noms logiques
1 disque permanent pour l'opérateur	DISK$SPHINX:[000000]
1 disque temporaire pour l'opérateur	SCRATCH$SPHINX:[000000]
1 disque permanent pour l'utilisateur	SPHINX$DISK:[000000]
1 disque temporaire pour l'utilisateur	SPHINX$SCRATCH:[000000]
1 imprimante graphique	SPHINX$PRINT
1 queue de traitement batch	SPHINX$QUEUE

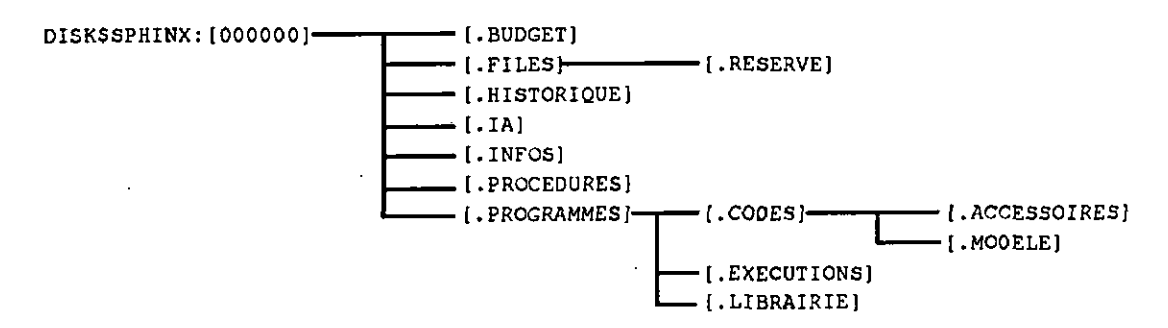
Sur NEDCU0:: (Université de Neuchâtel), les unités physiques sont:

Noms logiques	Valeur sur NEDCU0::
DISK$SPHINX:[000000]	DISK$GEOL:[TACHER.SPHINX]
SCRATCH$SPHINX:[000000]	SCRATCH:[TACHER]
SPHINX$DISK:[000000]	DISK$GEOL:[participant.SPHINX]
SPHINX$SCRATCH:[000000]	SCRATCH:[participant]
SPHINX$PRINT	GEOL_1
SPHINX$QUEUE	NEDCU4_BATCH

Ces noms logiques sont à redéfinir en cas de déplacement du logiciel.

STRUCTURE ET CONTENU GLOBAL DES UNITES PHYSIQUES, DESIGNEES PAR LEUR NOM LOGIQUE

DISK$SPHINX: [000000]



Contenu global

DISK$SPHINX: [BUDGET] contient les fichiers de budget ('participant'.BUD) et devis ('participant'.DEV) propres à chaque utilisateur. Il y a autant de fichiers DISK$SPHINX: [BUDGET]participant.BUD, et .DEV que d'utilisateurs.

DISK$SPHINX: [FILES] contient les fichiers représentant le domaine réaliste:
- SPHINX.ELM, Topologie des élements
- SPHINX.COR, Coordonnées des nœuds
- SPHINX.PAR, Valeurs des paramètres
- SPHINX.RES, Potentiels hydr. au repos
- SPHINX.CLIMAT, Données climatiques

DISK$SPHINX: [FILES.RESERVE] n'est pas indispensable au fonctionnement du logiciel. Il est cependant commode pour stocker les fichiers représentant un domaine réaliste en cours de préparation par l'opérateur.

DISK$SPHINX: [HISTORIQUE] contient le fichier 'participant'.HIST (historique des manipulations) de chaque utilisateur.

DISK$SPHINX: [IA] contient les versions source des programmes destinés à contrôler l'action du participant, ainsi qu'une librairie spécifique (Routines objet) DISK$SPHINX: [IA]IALIB.OLB

DISK$SPHINX: [INFOS] contient tous les fichiers texte destinés à l'information du participant. Le préfixe du nom du fichier renvoie au nom de la procédure concernée. Ex: 51.INFO renseigne sur l'action de la procédure 51.COM

DISK$SPHINX:[PROCEDURES] contient les procédures de communication, rédigées en langage VMS. Le préfixe du nom renvoie au numéro d'appel dans les menus emboités. Ex: 51.COM est activée quand l'utilisateur choisit la première rubrique du point 5 du menu principal.

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES] n'est pas indispensable au fonctionnement du logiciel. Il contient les versions source des programmes (Vax Fortran 77), que l'opérateur a intéret à conserver en vue d'éventuelles modifications. Les programmes correspondent aux outils et utilisent parfois les routines stockées dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]

Contenu du directory DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES] et description sommaire.

BUILDF.FOR	Crèe, lors de la première utilisation, les fichiers participant.BUD, .DEV et .HIST.
CAPTAGE.FOR	En fin d'exercice, écrit les coordonnées et la profondeur du captage définitif dans l'historique des manipulations. Par la suite, permet d'interdire l'accès au logiciel.
DECLARATION.TXT	Fichier de variables, inclus dans les programmes.
DEVIS.FOR	Etablissement et validation de l'offre.
DRAWCLIMAT.FOR	Représentation graphique des données climatiques.
DRAWGEOL.FOR	Champ Nature pétrographique & faciès sur D2 (carte geologique).
DRAWLOG.FOR	Réprésentation graphique de log de forage.
DRAWOP.FOR	Carte des opérations effectuées par l'utilisateur.
DRAWTOPO.FOR	Carte topographique.
FLOWMETRE.FOR	Calcul des débits verticaux dans un piézomètre.
FORAGE_2DNS.FOR	Installation de forage 2".
FORAGE_6CAS.FOR	Installation de forage 6" carotté avec surv.
FORAGE_6CNS.FOR	Installation de forage 6" carotté sans surv.
FORAGE_6DNS.FOR	Installation de forage 6" destructif.
INTERPRET.FOR	Interpretation graphique de sondage électrique.
MKTRAN.FOR	Axquisition de paramètres transitoires pour essais de pompage de durée limitée.
MODI_RESEAU.FOR	Affinage du réseau d'éléments finis autour d'une arète verticale donnée.
PERMEAMETRE.FOR	Reconstitution d'essai au perméamètre.
PREFLOWMETRE.FOR	Acquisition interactive des paramètres nécessaires au modèle de flowmètre.
PREPOMPAGE.FOR	Acquisition interactive des paramètres nécessaires au modèles d'essais de pompage.
SHOWQUEUE2.FOR	Interdit l'accès au logiciel et provoque la sortie si un essai de pompage ou de flowmètre est en cours.
SHOWQUOTA.FOR	Interdit l'accès au logiciel si la mémoire de masse de l'utilisateur est < 200 blocks.
SONDAGE.FOR	Modèle de sondege électrique.
TEST_MEMORY.FOR	Interdit l'accès au logiciel si la mémoire paginée est < 50'000 blocks (dépend de D3; cf § 4.1.3).

THORNTHWAITE.FOR	Calcul d'ETP selon Thornthwaite.
TOURNEE_HP.FOR	Calcul des rabattements et ecriture aux piézomètres, après modèle de pompage longue durée.
TOURNEE_HT.FOR	Idem pour pompage de durée limitée.
TRAINE.FOR	Modèle de trainé électrique.
TURC.FOR	Calcul d'ETP selon Turc.
VITESSE.FOR	Outil Vitesse réèlle.

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES.ACCESSOIRES] regroupe les versions source de programmes non indispensables, destinés à faciliter la tâche de l'opérateur qui construit un nouveau domaine réaliste. (Utilitaires de construction, tests).

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES.MODELE] contient les versions sources des programmes de calcul des écoulements souterrains. Ces programmes n'utilisent pas les routines stockées dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]

Contenu du directory DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES.MODELE] et description sommaire.

FEN1.FOR FEN1S1.FOR FEN1S2.FOR FEN1S3.FOR	Modèle hydrodynamique, régime permanent. Calcul de l'état de l'aquifère au repos et sous l'effet d'un débit imposé. (pompages longue durée)
FEN2.FOR FEN2S1.FOR FEN2S2.FOR	Modèle hydrodynamique, régime non stationnaire (pompage de durée limitée)
FEN2S3.FOR FEN2S4.FOR	Note: Les programmes FEN1 et FEN2 sont stockés en plusieurs sections.

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS] contient toutes les versions exécutables des programmes.

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE] contient les versions source des routines utilisés par les programmes stockés dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]. Les versions objet correspondantes à ces routines sont regroupées dans la librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.OLB

Contenu du directory DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE] et description sommaire des routines.

ACCES.FOR	Interdit l'accès aux programmes "payants" si le budget est épuisé ou si le captage est déja fait.
ALLOW_USE.FOR	Interdit l'accès aux programmes "payants" tant que l'offre n'est pas validée.
BIP.FOR	Signal sonore.

CAROTTE.FOR	Calcul du vecteur des épaisseurs des éléments à la verticale de tout point de surface et vecteur des classes d'equivalence.
CHECKINT.FOR	Gestion d'erreur à l'introduction interactive d'un nombre entier.
CHECKREAL.FOR	Idem pour les nombres réels.
CORRESPONDANCE.FOR	Valeur de tous les paramètres pour une classe d'équivallence donnée. De plus, contient les grandeurs nécessaires à l'établissement et au contrôle du devis, les coordonnées du polygone définissant la zone urbaine, etc.
EDITION.FOR	Formats Fortran utilisés par les autres programmes lors des opérations de lecture/écriture.
FACTURATION.FOR	Mise à jour du budget et de l'historique des manipulations, suite à une manipulation facturable.
GKSEND.FOR	Désactivation de PLOT10 GKS.
GKSSTART.FOR	Initialisation de PLOT10 GKS.
HCAROTTE.FOR	Idem CAROTTE.FOR, pour le vecteur des potentiels hydrauliques à l'interface entre éléments.
LOKIRE2D	Recherche des coordonnées locales (s,t) correspondant à un (x,y) de surface.
NOEUD_MAJ.FOR	Recherche interactive du nœud coin le plus proche d'un point de surface donné par l'utilisateur.
OLDFILE.FOR	Vérifie que 2 fichiers de l'utilisateur ne portent pas le même nom.
OPCOR3D.FOR	Chargement en mémoire centrale des coordonnées des nœuds de D3.
OPELM3D.FOR	Chargement en mémoire centrale de la topologie des éléments finis constituant D3.
PATIENCE.FOR	Message d'attente.
ZONE_URBAINE.FOR	Vérifie qu'un point donné est en dehors d'un polygone.
SPHINXLIB.OLB	Contient la version objet de toutes ces routines.

SPHINX$DISK:[000000] est le sous-directory [participant.SPHINX] dans lequel le logiciel ecrit les fichiers permanents produits.
SPHINX$SCRATCH:[000000] et **SCRATCH$SPHINX:[000000]** recueillent les fichiers temporaires.

Des sous-directories complémentaires sont aménageables partout sans conséquence.

Dans tout le logiciel, les fichiers permanents ou temporaires sont assignés de manière cohérente. Les equivalences sont les suivantes:

SPHINX: ASSIGNATIONS

CONTENU/FONCTION	NOM LOGIQUE	\
FICHIER D'ELEMENTS INPUT	FOR000	IELEM1
FICHIER O'ELEMENTS OUTPUT	FOR001	IELEM2
FICHIER OU CONTENU DE NEDCU4 BATCH	FOR002	IQUEUE
FICHIER VIDE TEST	FOR003	ITEST
FICHIER DE PARAMETRES INPUT (Hydraulique et chimique)	FOR005	IPAR
FICHIER DE PARAMETRES OUTPUT	FOR006	IPARMOI
FICHIER DE MATRICE DE RIGIDITE	FOR007	INMAT
FICHIER OES EQUATIONS	FOR008	INEQU
FICHIER DE COORDONNEES INPUT	FOR010	ICORD1
FICHIER DE COORDONNEES OUTPUT	FOR011	ICORD2
FICHIER DES CONOITIONS INITIALES MODELE HYDRODYNAMIQUE	FOR015	ININI
FICHIER DE RESULTATS O'UN POMPAGE	FOR016	INRES
FICHIER SEQUENTIEL MODELE	FOR017	INDST
INTERPRETATION OE SONDAGE ELECTRIQUE	FOR019	INTERSC
FICHIER DE SONDAGE ELECTRIQUE	FOR020	ISONDEI
FICHIER DE SONDAGE MECANIQUE	FOR021	ISONDME
FICHIER DE POTENTIELS H. MESURES A L'AVANCEMENT	FOR022	ISONDSL
FICHIER RESULTAT DE FLOWMETRE	FOR024	IFLOWRE
RESULTAT OE TRAINE ELECTRIQUE	FOR025	ITRAINE
FICHIER ANNEXE (cf pompages et flowmétre)	FOR030	INQU
FICHIER TEMPORAIRE LISTE DES FORAGES EFFECTUES	FOR032	IFORLIS
FICHIER RESULTAT D'UNE TOURNEE PIEZO OU DE L?OUTIL VITESSE REELLE.	FOR033	ITOURNE
LISTE DIRECTORY DES FICHIERS FOR100.TRA XXX	FOR034	ITRANLI
FICHIER DES PARAMETRES TRANSITOIRES FE (FOR10X.TRA XXX) 1 par dt.	FOR037	ITRAN
OONNEES CLIMATIQUES (DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT)	FOR045	INCL
ETAT OU DEVIS (Définitif ou pas)	FOR049	IDEVIS
FICHIER OE BUDGET INPUT	FOR050	IBUD1
FICHIER DE BUDGET OUTPUT	FOR051	IBUD2
FICHIER DE L'HISTORIQUE DES MANIPULATIONS	FOR053	IHST
FICHIER D'ERREUR GKS	FOR060	INERR
METAFILE GKS	FOR061	INMET

4.1.2 Déroulement schématique d'une session. Procédure SPHINX.COM

La procédure principale est DISK$SPHINX:[PROCEDURES]SPHINX.COM
Son activation provoque le fonctionnement du logiciel; ses fonctions sont les suivantes:

- Définir les noms logiques
- Reconnaitre le type de station/terminal utilisé et charger les séquences <ESC> correspondantes (gestion d'écran).
- Vérifier que la mémoire de masse disponible de l'utilisateur est >= 200 blocks.
- Vérifier que la mémoire paginée de l'utilisateur est >= 50'000 blocks.
- Interdire l'accès si un job SPHINX de l'utilisateur est en cours sur SPHINX$QUEUE.
- En cas de première utilisation, créer le directory

  SPHINX$DISK:[participant.SPHINX], créer les fichiers

  DISK$SPHINX:[BUDGET]participant.BUD (fichier budget)

  DISK$SPHINX:[BUDGET]participant.DEV (fichier devis)

  DISK$SPHINX:[BUDGET]participant.HIST (fichier historique).
- Afficher le menu principal et permettre le choix d'une action; il y a alors appel des procédures correspondantes.
- Interrompre la session si une action en cours fait l'objet d'un traitement batch (pompages ou flowmètre); ceci afin de ne pas surcharger l'ordinateur.

4.1.3 Besoin de l'utilisateur en mémoire centrale.

Le fonctionnement des programme nécessite une mémoire centrale minimum. TEST_MEMORY, appelé par la procédure principale SPHINX.COM vérifie qu'une telle mémoire est à disposition de l'utilisateur, sous forme de mémoire paginée. En cas d'échec, l'accès au logiciel est refusé.

Estimation de la mémoire nécessaire.

Les programmes Fortran SPHINX incluent à leur début un fichier externe (DECLARATION.TXT) qui contient la déclaration de toutes les variables et paramètres. Ce fichier, commun à presque tous les programmes du logiciel, garantit une homogénéité dans les notations et les dimensions des vecteurs; il limite donc sensiblement les risques d'erreur de programmation. En contre-partie, chaque programme n'utilise de fait qu'une partie des variables declarées. Ce fichier est déterminant pour les besoins en mémoire centrale.

Dans la configuration actuelle, pour un domaine réaliste pouvant contenir jusqu'à 4 couches (MAXCOUCHES=4), on obtient:

Type	byte/valeur	Nombre de valeurs	Nombre de bytes
ENTIERS	(4 bytes)	273'231	1'092'924
REELS	(4 bytes)	227	908
REELS	(8 bytes)	282'223	2'257'784
CARACTERES	(1 byte)	85'598	85'598

Total 3'437'214 ≈ 6'800 blocks.

MAXCOUCHES intervenant dans tous les vecteurs de grande dimension, il influence de manière pratiquement linéaire la consommation en mémoire centrale.

Considérons maintenant que les sous-routines incluent également DECLARATION.TXT. Il faudrait pour chacune, ajouter cette même valeur au besoin total du programme, si les grands vecteurs n'étaient pas placés dans des zones de mémoire commune. Ainsi, 74 % de la mémoire nécessaire n'est réservée qu'une seule fois, au début du programme, le reste devant cependant être sommé pour chaque routine.

Il faut encore ajouter la place nécessaire au système d'exploitation lors de l'éxécution, difficile à estimer.

Pour ces raisons, TEST_MEMORY vérifie que l'utilisateur dispose de **50'000 blocks** de mémoire paginée.

4.1.4 Menus

Les menus sont emboités sur 2 niveaux; pour chaque masque, le choix d'une opération s'effectue en introduisant le numéro correspondant. La figure 4.1 montre l'ensemble des fonctions accessibles.

Les numéros désignant les menus renvoient aux numéros d'identification des procédures. Par exemple, le choix du point 2 (niveau 2) du point 1 (niveau 1) provoque l'execution de la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]12.COM.

La figure 4.2 indique où interviennent les fichiers, programmes et procédures.

NIVEAU 1

0 Informations generales
1 Donnees → 1.1–1.3
2 Hydrologie → 2.1–2.3
3 Geophysique → 3.1–3.2
4 Piezometres → 4.1–4.5
5 Essais de pompage → 5.1–5.3
6 Vitesse reelle
7 Ouvrage de captage
8 Budget → 8.1–8.6
9 Utilitaires → 9.1–9.14

10 L'œil du maitre

11 Sortie

NIVEAU 2

1.1 Prendre connaissance du mandat
1.2 Etablir le devis (obligatoire)
1.3 Bibliographie

2.1 ETP selon Thornthwaite
2.2 ETP selon Turc
2.3 Donnees climatiques

3.1 Faire un sondage electrique
3.2 Faire un traine electrique

4.1 Implanter un piezometre de 2" par battage (Sans surveillance)
4.2 Implanter un piezometre de 6" par sondage destructif (Sans surveillance)
4.3 Implanter un piezometre de 6" par sondage carotte (Sans surveillance)
4.4 Implanter un piezometre de 6" par sondage carotte (Avec surveillance)
4.5 Essai de permeametre a charge variable

5.1 Effectuer un essai de pompage longue duree dans un piezometre
5.2 Effectuer un essai de pompage de duree limitee dans un piezometre
5.3 Flowmetre

8.1 Consulter le budget actualise
8.2 Consulter le devis initial
8.3 Consulter l'historique des manipulations
8.4 Imprimer le budget actualise
8.5 Imprimer le devis initial
8.6 Imprimer l'historique des manipulations

9.1 Dessiner/imprimer la carte topographique
9.2 Dessiner/imprimer la carte geologique
9.3 Dessiner/imprimer la carte des operations effectuees
9.4 Dessiner/imprimer un log de forage
9.5 Interpreter graphiquement un sondage electrique
9.6 Voir un fichier resultat de sondage electrique
9.7 Voir un fichier interpretation de sondage electrique
9.8 Voir un fichier resultat de traine electrique
9.9 Voir un fichier resultat de sondage mecanique
9.10 Voir un fichier de potentiels en cour de forage
9.11 Voir un fichier resultat de tournee piezometrique
9.12 Voir un fichier resultat de flowmetre
9.13 Voir un fichier Vitesse reelle
9.14 Imprimer un fichier

Figure 4.1 Fonctions des menus emboités. Le niveau 1 est le menu principal.

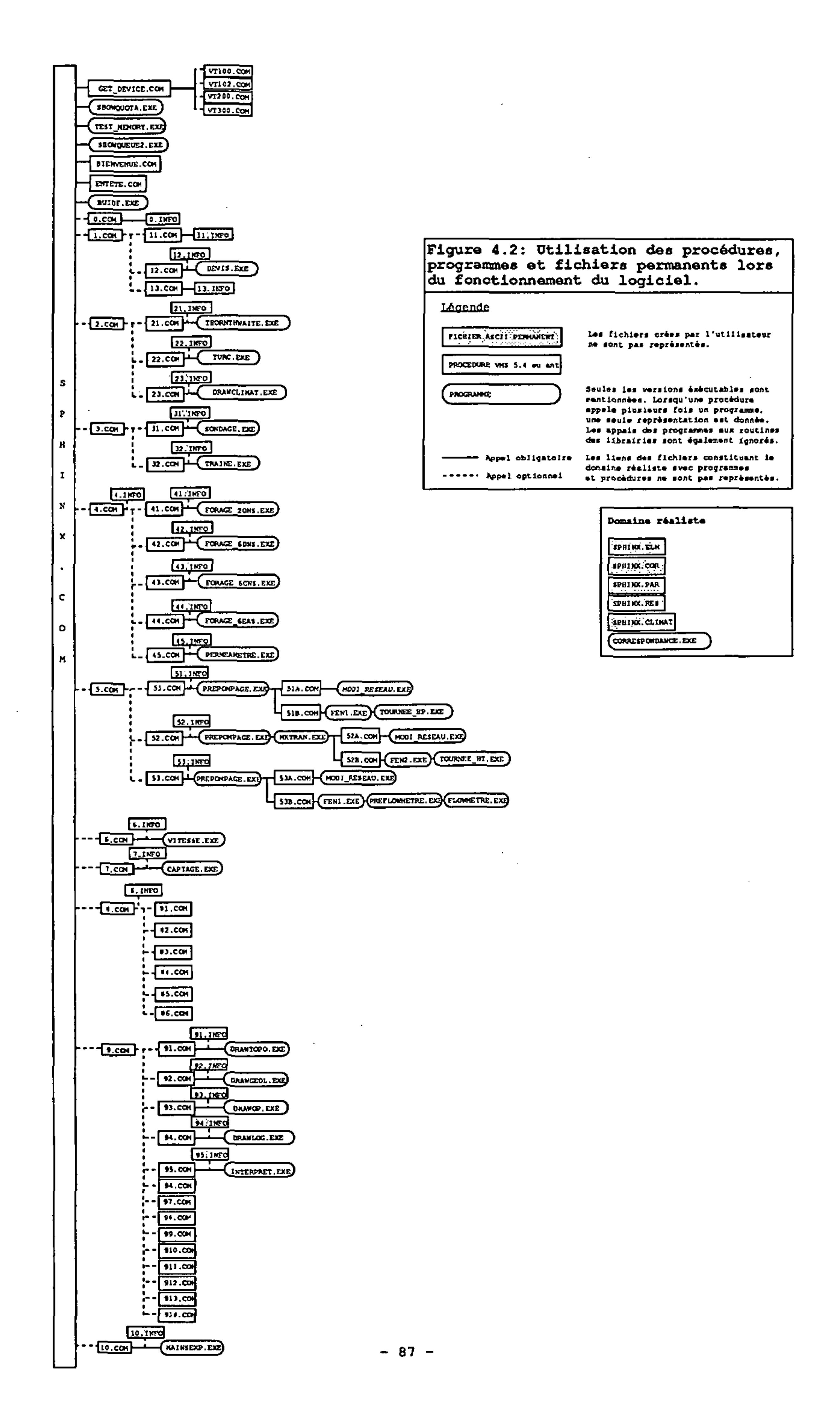


Figure 4.2: Utilisation des procédures, programmes et fichiers permanents lors du fonctionnement du logiciel.

4.1.5 Strucure d'un programme SPHINX

La structure générale d'un programme Fortran SPHINX est la suivante:

```
      PROGRAM FORAGE_2DNS

C     Compilation :   FORTRAN FORAGE_2DNS
C     Ed des liens:   LINK/EXE=DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS] FORAGE_2DNS,
C                            DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB,
C                            SYS$GKS:SGKS/LIB !Si graphisme et sur NEDCU0.
C     Declaration des variables contenues dans le fichier
C     DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT

      INCLUDE 'DECLARATION.TXT'

C     Le devis a t-il ete fait? Si non, accès refusé.
C     La routine DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]ALLOW_USE
C     contenue dans la librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB
C     n'est appelée que par les programmes dont l'utilisation est facturée.

      CALL ALLOW_USE()


C     Chargement des formats de lecture et d'ecriture, pour toute unité physique.
C     Les formats sont dans la routine EDITION de la
C     librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.
C     Par ce biais, tout programme SPHINX peut lire des fichiers
C     produits par d'autres programmes, sans risque d'erreur.

      CALL EDITION(FST)


C     Acces interdit si budget nul ou captage déja installé. La routine est dans la librairie
C     DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB

      CALL ACCES(IBUD1,ISTATBUD,MINISOLDE)


C     Corps du programme avec appels à des routines, soit internes
C     soit contenues dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB

      CALL CHECKREAL(CREMENT,IERR)
      CALL CHECKINT(IREPPROF,IERR)
      CALL OPELM3D(1,NBELM2,NBELM3)
      .

C     Facturation. Le budget est mis à jour par
C     DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]FACTURATION
C     Cette routine entretient également l'historique des manipulations.
      CALL FACTURATION(NATURE,IREPPROF,IBUD1,IBUD2,XS,YS)

      END
```

Les routines de contrôle d'accès et de facturation ne seront plus mentionnées dans la description des programmes (cf § suivants).

4.2 Budget

4.2.1 Etablissement d'un devis

L'utilisateur définit lui-même le montant dont il disposera pour parvenir à son but. Le programme DEVIS a les fonctions suivantes:

- Imposer la nature des manipulations à prendre en considération,
- Stocker et analyser les propositions de l'utilisateur,
- Si l'offre est acceptable à la fois pour l'élève et pour le programme, enregistrement définitif du montant total (TOTAL), qui devient alors le budget du prospecteur.

Seul le total est sauvegardé. L'utilisateur peut donc s'écarter des proportions initialement prévues pour chaque rubrique.

Rappel: Lors de la première utilisation du logiciel, 3 fichiers sont créés:

DISK$SPHINX:[BUDGET]'participant'.BUD
DISK$SPHINX:[BUDGET]'participant'.DEV
DISK$SPHINX:[HISTORIQUE]'participant'.HIST

A chaque tentative d'établir ou de modifier l'offre, le programme lit dans le fichier .DEV, l'état de celle-ci telle qu'elle a auparavant été laissée, puis autorise les modifications.

Lorsque l'offre est validée, une ligne supplémentaire est écrite au bas du fichier .DEV:

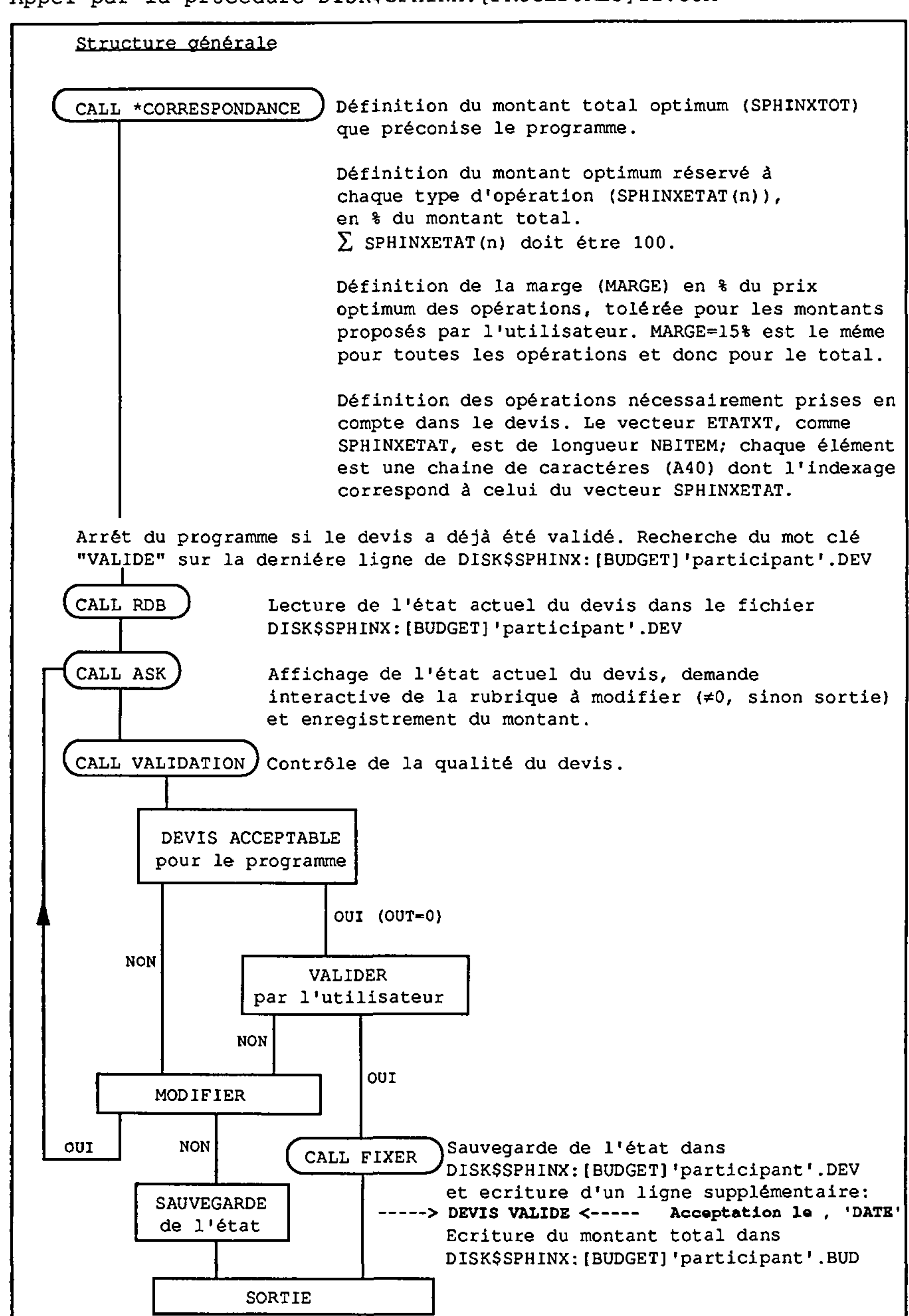
-----> DEVIS VALIDE <-----   Acceptation le 'DATE'

Dès lors: Le programme DEVIS n'est plus accessible (l'offre n'est plus modifiable).
Les outils dont l'utilisation est facturée deviennent disponibles. La routine *ALLOW_USE, placée au début des programmes correspondant vérifie que le mot clé "VALIDE" figure à la dernière ligne de DISK$SPHINX:[BUDGET]'participant'.DEV. Dans la négative, le programme appelant est arrêté.

Les fonctions du fichier .DEV sont les suivantes:
- Eviter à l'utilisateur de réintroduire tous les montants s'il procède en plusieurs sessions.
- Servir dans une discussion avec un expert, pendant ou aprés l'exercice.
- Conserver pour le logiciel, la preuve que le devis a été réalisé et accepté.

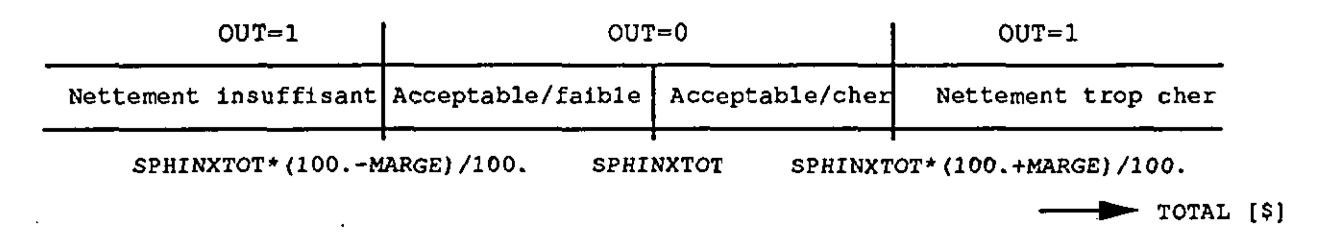
Programme DEVIS

Fabrication du budget par l'utilisateur
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]12.COM



Fonctionnement de la routine VALIDATION

- Un premier contrôle est effectué sur le montant total du devis.
  4 cas sont distingués, produisant chacun un message:



- Ensuite, contrôle par rubrique

3 cas possibles, pour une rubrique n

OUT=1 | OUT=0 | OUT=1

SPHINXETAT*(100.-MARGE)/100. SPHINXETAT(n) SPHINXETAT*(100.-MARGE)/100.

ETAT(n) [$]

Rubrique suivante

Il suffit d'une rubrique dont le montant soit inacceptable pour que OUT=1.

Les fichiers .DEV, .BUD et .HIST portent en première ligne le nom de l'utilisateur.

4.2.2 Facturation

La mise à jour du budget, suite à une manipulation facturable est effectuée par la routine FACTURATION.FOR de la librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.OLB. Chaque type d'opération est repéré par un numéro d'ordre de 1 à 10 (NBITEM = 10); le programme appelant transmet ce numéro (NATURE) ainsi que la quantité (NOMBRE) par laquelle il faut multiplier le prix unitaire de l'opération:

MANIPULATION	NUMERO	QUANTITE
Sondage électrique	1	1
Trainé électrique	2	Nombre de stations
Forage 2"	3	Profondeur
Forage 6" carotté non surv.	4	Profondeur
Forage 6" carotté surv.	5	Profondeur
Forage 6" destructif	6	Profondeur
Forfait tournée piézo.	7	1
Tournée piézo. (modèle hydraulique)	8	Nombre de piézo.
Vitesse réelle.	9	1
Flowmètre	10	1

Les prix unitaires sont lus dans 'participant'.BUD

4.3 Stockage du domaine réaliste

6 fichiers sont nécessaires à la construction des modèles.

La forme du champ de paramètres constituant D3 est représentée par 2 fichiers :
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.ELM contient la topologie des éléments finis.
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.COR contient les coordonnées géométriques des nœuds.

La valeur des paramètres est dans DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR et DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR.

DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.RES décrit les potentiels hydrauliques partout dans l'aquifère à l'état de repos.

DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT contient les données climatiques.

On trouvera au chapitre V les règles de construction de ces fichiers. Leur contenu actuel figure à l'annexe 6.

4.4 But et données du problème

Les "règles du jeu" sont contenues dans le logiciel; l'utilisateur peut les consulter à tout moment, sans affecter son budget. Les informations générales affichées par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]0.INFO. sont les suivantes:

SPHINX: Informations generales.

1) Principe:

SPHINX est un ensemble de procedures et de programmes destines a l'enseignement, orientes vers la prospection hydrogeologique.

La prospection hydrogeologique simulee se pratique sur un domaine fictif qui constitue une simplification du milieu naturel represente. Par ailleurs, le comportement de ce domaine face aux diverses operations qu'il est possible d'effectuer correspond a la construction de modeles (hydrauliques, electriques...).
Dans la mesure du possible, les modeles reproduisent le comportement d'un systeme reel, mais ne sont pas le systeme reel:
- Le domaine est une approximation de l'aquifere represente (formes simples),
- Les modeles produits admettent des hypotheses simplificatrices qui eloignent encore le comportement de l'aquifere simule de celui de l'aquifere reel.

De ce fait, du point de vue de l'utilisateur, les "regles du jeu" ne sont pas tout a fait celles de la prospection relle. Par exemple, un sondage electrique dans SPHINX reproduira la reponse de l'aquifere en supposant que les couches ont une extension laterale infinie.

Les hypotheses de travail sont expliquees en detail au fil des operations; il faut en tenir compte.

2) Fonctionnement:

Il suffit que chaque participant dispose d'un directory principal, dans lequel SPHINX creera automatiquement un sous-directory. (Ex: [participant.SPHINX])

Les fichiers crees lors de certaines operations y seront places. Ces fichiers sont parfois utilises apres leur creation par d'autres fonctions de SPHINX:

VOUS NE DEVEZ DONC EN AUCUN CAS TENTER DE LES MODIFIER.
****

Pour les examiner, les utilitaires appropries sont contenus dans SPHINX.

De meme pour les imprimer. L'imprimante assignee a SPHINX est GEOL_1.

La structure modulaire de SPHINX le rend facile a utiliser. Les menus sont organises de maniere hierarchique. Les erreurs de manipulation ne portent pas a consequence.

3) Realisation:

Implantation: VAX
Procedures: VMS V5.4-2
Programmes: VAX FORTRAN77
Librairie graphique: PLOT10 GKS

4.4.1 But

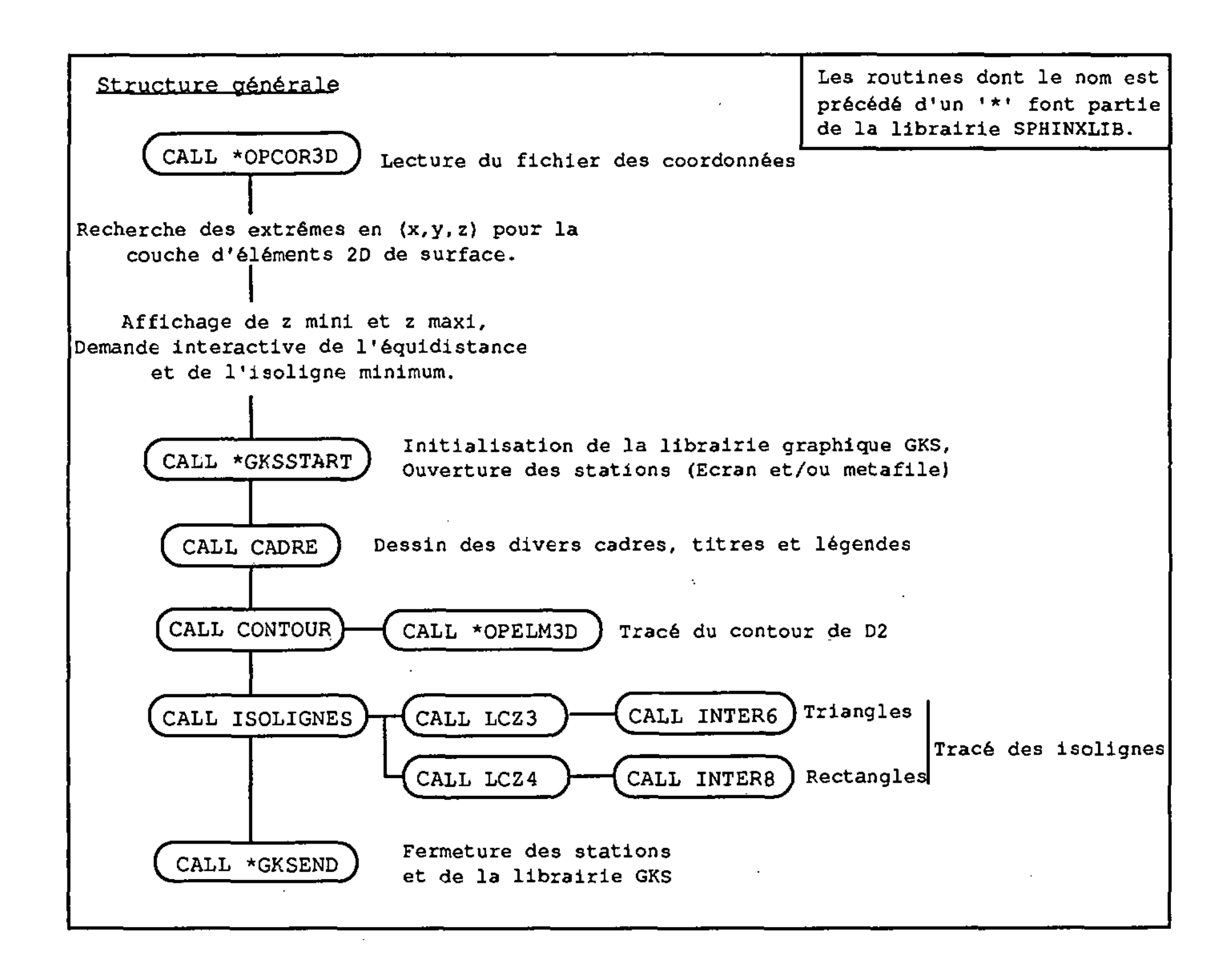
Le point 1.1 du menu fait apparaitre un fichier texte, DISK$SPHINX:[PROCEDURES]11.INFO, dont le contenu est le suivant:

Le but est de trouver dans le domaine réaliste un point (x,y) où imposer un Débit de 10'000 [m^3/jour], sans provoquer un rabattement supérieur à 0.8 [m], ni en ce point ni en d'autres. La distance de ce point au lieu d'exploitation (X = 903'000, Y = 220'500) doit être inférieure à 1'500 [m]. Le champ des vitesses reelles doit permettre de prevoir qu'une pollution provenant de la zone urbaine ne gagnera pas (x,y) en moins de 10 jours.

Pour y parvenir, une offre doit être constituée et validée par le logiciel. Par la suite, la plupart des opérations seront facturées; l'accès au logiciel sera interdit lorsque le budget ainsi constitué sera épuisé.

4.4.2 Carte topographique. Programme DRAWTOPO.

Représentation graphique de la cote z sur D2
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]91.COM



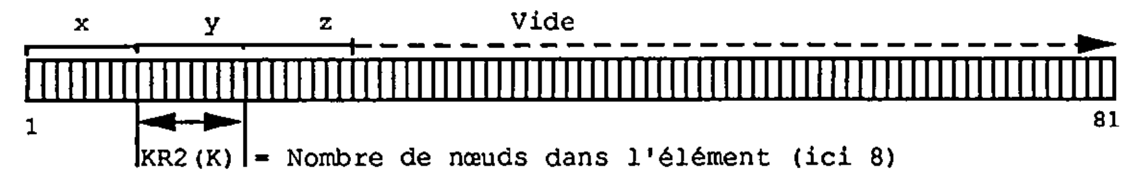
Fonctionnement de la routine CONTOUR

- Lecture du fichier des éléments et chargement en mémoire centrale.
- Comptage du nombre d'apparitions (vecteur IOC) de chaque noeud dans tout le fichier des éléments.
- Pour chaque arête de chaque élément, le noeud milieu apparait-il une seule fois dans le fichier?
  Si oui, on dessine l'arête. Les noeuds du milieu des arêtes sont connus parce que l'énumération des noeuds pour chaque élément commence par un coin.

Fonctionnement de la routine ISOLIGNES

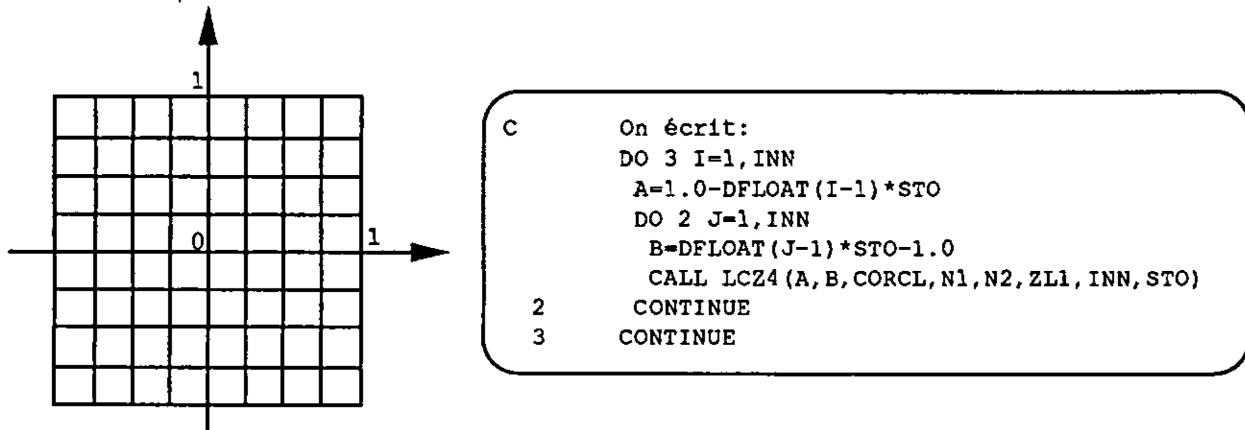
Pour un élément de surface donné K

- Copie des coordonnées des nœuds le constituant dans CORCL;
  (Illustration dans le cas d'un rectangle)



= Nombre de nœuds dans l'élément (ici 8)

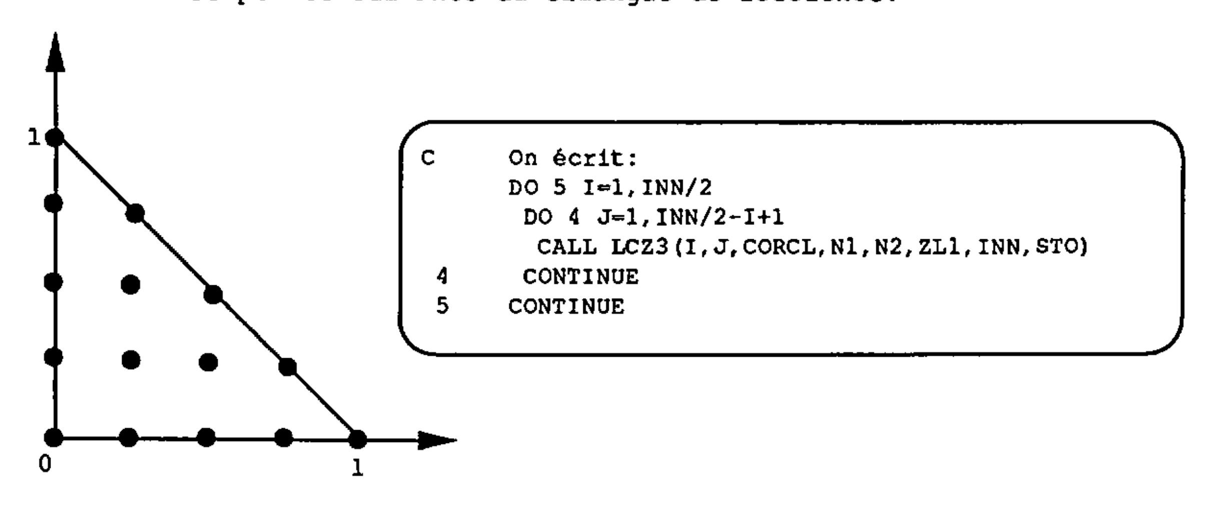
- Si KR2(K) = 8 (Rectangle)
  Découpage de l'élément de référence en INN*INN carrés
  (INN est fixé à 8, STO = 2/INN vaut 0.25 = coté d'un petit carré, ce qui est un compromis favorable entre rapidité de calcul et finesse du tracé).




```
C        On écrit:
         DO 3 I=1,INN
          A=1.0-DFLOAT(I-1)*STO
          DO 2 J=1,INN
           B=DFLOAT(J-1)*STO-1.0
           CALL LCZ4(A,B,CORCL,N1,N2,ZL1,INN,STO)
  2       CONTINUE
  3      CONTINUE
```

Appel de la routine LCZ4 pour chaque petit carré, repéré par les coordonnées de son coin inférieur droit dans l'espace local.

- Si KR2(K) = 6 (Triangle)
  La boucle d'appel de la routine LCZ3 permet de définir dans celle-ci les points suivants du triangle de référence.




```
C      On écrit:
       DO 5 I=1,INN/2
        DO 4 J=1,INN/2-I+1
         CALL LCZ3(I,J,CORCL,N1,N2,ZL1,INN,STO)
 4      CONTINUE
 5     CONTINUE
```

Elément suivant

Fonctionnement de la routine LCZ4

Pour un petit carré dans l'élément de référence
Pour chacun de ses 4 coins, dont les coordonnées locales sont connues
  Calcul des fonctions d'interpolation N (routine INTER8)
  Calcul de z (noté ZLC):

```
C     On écrit
      DO 1 J=1,8
       ZLC(L+1,I+1)=ZLC(L+1,I+1)+N(J)*CORCL(J+16)
  1   CONTINUE
```

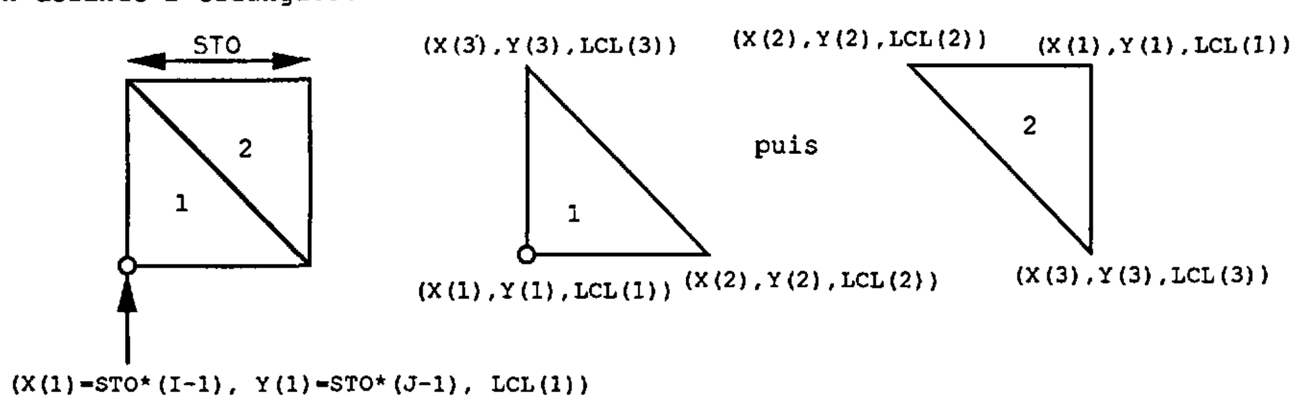
Pour une valeur possible d'isoligne
  Pour un coté du carré
    Recherche du point d'intersection, par interpolation linéaire
      Si intersection et N3 = 0 | le point d'intersection est (YBATH(1),YBATV(1))
      N3 = 1

      Si intersection et N3 ≠ 0 | le point d'intersection est (YBATH(2),YBATV(2))
      N3 = 1

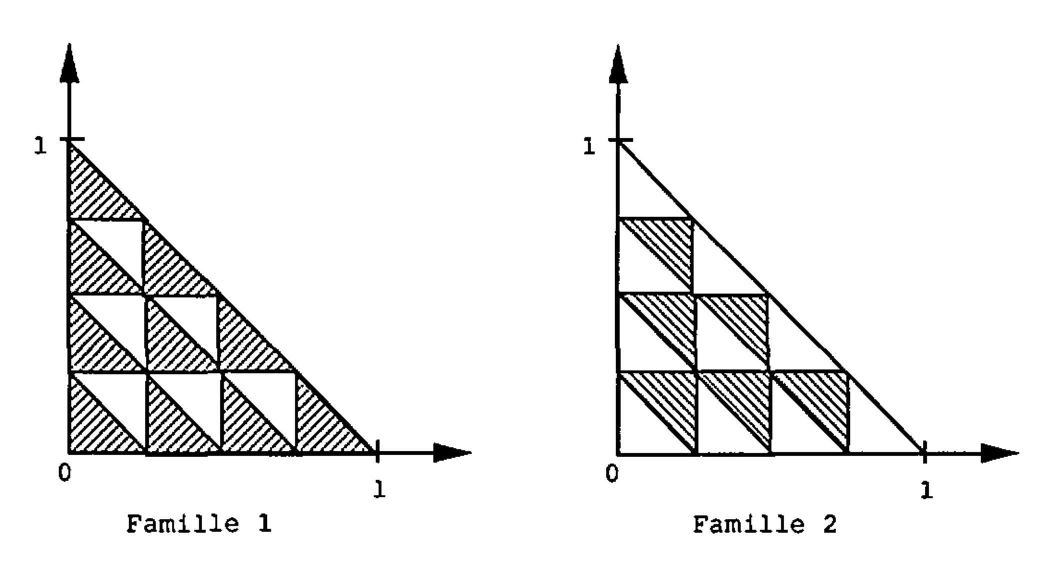
  Coté suivant
  Si l'isoligne xx traverse le carré (N3=1)
    Pour chacun des 2 points d'intersection YBATH,YBATV
      Calcul des fonctions d'interpolation
      Calcul des coordonnées correspondantes dans l'espace réel
    Tracé du segment
Isoligne suivante

Fonctionnement de la routine LCZ3

Pour chaque point (O) établi par ISOLIGNES dans le triangle de référence, on définit 2 triangles.



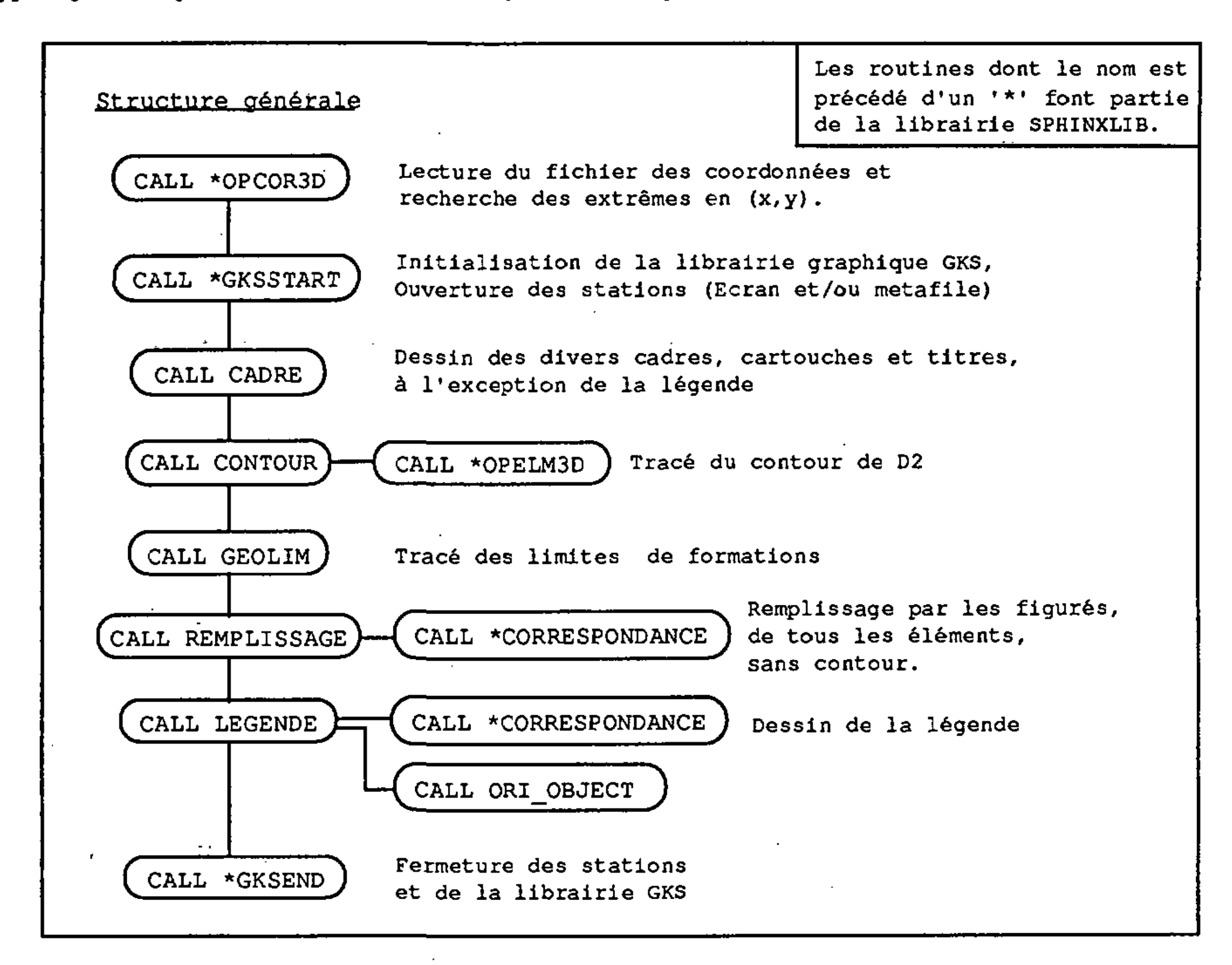
Sur l'élément de référence, chaque famille correspond aux triangles suivants:



Pour chaque point, les 2 triangles sont traités successivement, en testant que l'angle droit du triangle 2 ne dépasse pas l'hypothénuse de l'élément de référence. On procède ensuite comme dans LCZ4, avec les fonctions d'interpolation correspondantes (INTER6).

4.4.3 Carte geologique. Programme DRAWGEOL.

Représentation graphique du champ Nature pétrographique & Faciès sur D2.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]92.COM



Fonctionnement de la routine CONTOUR

- Lecture du fichier des éléments et chargement en mémoire centrale.
- Comptage du nombre d'apparitions de chaque noeud dans tout le fichier des éléments. Vecteur IOC.
- Pour chaque arête de chaque élément, le noeud milieu apparait-il une seule fois dans le fichier?
  Si oui, on dessine l'arête. Rem: Les noeuds du milieu des arêtes sont connus parce que l'énumération des noeuds pour chaque élément commence par un coin.

Fonctionnement de la routine GEOLIM

- En vue de sa réutilisation, le vecteur IOC est remis à 0.
- Pour le noeud milieu de chaque arête d'élément, on suppose que le nombre d'apparitions IOC vaut le numéro de la classe d'équivalence de l'élément. Si ce numéro change par la suite (lecture de la même arête, cette fois appartenant à un élement d'une autre classe d'équivalence), alors il y a limite et on trace l'arete.

Schématiquement:

```
┌──►Pour chaque élément
│ ┌─►Pour chaque arête
│ │  si IOC du noeud milieu = 0       (pas encore apparu)
│ │   alors, IOC du noeud milieu = numéro de la classe d'équivalence
│ │  sinon
│ │   si IOC du noeud milieu ≠ numéro de la classe d'équivalence de
│ │   l'élément (ce noeud a déjà été lu et appartenait à un élément
│ │   dont le numéro de classe d'équivalence n'était pas celui qui
│ │   est lu maintenant)
│ │    alors, on dessine l'arête.
│ └── Arête suivante
└─── Elément suivant
```

On écrit:

```
   DO 3 I=1,NBELM2
    DO 2 J=1,INT(KR2(ILM2(I))/2)-1              !Toutes aretes sauf derniere.
     IF(IOC(NIC2(ILM2(I),2*J)).EQ.0)THEN
      IOC(NIC2(ILM2(I),2*J))=NP(ILM2(I))
     ELSE
      IF(IOC(NIC2(ILM2(I),2*J)).NE.NP(ILM2(I)))THEN
       DO 1 K=0,2
        TRY(K+1)=XR2(NIC2(ILM2(I),2*J+K-1))
        TRZ(K+1)=YR2(NIC2(ILM2(I),2*J+K-1))
1      CONTINUE
       CALL GPL(3,TRY,TRZ)
      ENDIF
     ENDIF
2   CONTINUE
    IF(IOC(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I)))).EQ.0)THEN       !Dernier segment
     IOC(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I))))=NP(ILM2(I))
    ELSE
     IF(IOC(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I)))).NE.NP(ILM2(I)))THEN
      TRY(1)=XR2(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I))-1))
      TRY(2)=XR2(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I))  ))
      TRY(3)=XR2(NIC2(ILM2(I),              1))
      TRZ(1)=YR2(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I))-1))
      TRZ(2)=YR2(NIC2(ILM2(I),KR2(ILM2(I))  ))
      TRZ(3)=YR2(NIC2(ILM2(I),              1))
      CALL GPL(3,TRY,TRZ)
     ENDIF
    ENDIF
3  CONTINUE
```

Suggestion: Le tracé des segment ou des éléments est un polygone défini par les noeuds. Entre eux, l'interpolation est linéaire. Pour reproduire la forme exacte des éléments, il conviendrait d'utiliser des fonctions quadratiques.

Routine LEGENDE

- Recherche de classes d'équivalence figurant dans D2. Il ne faut pas mentionner les classes d'équivalence "n'affleurant pas".
- Tracé des figurés et des légendes correspondantes. La routine ORI_OBJECT choisit l'emplacement du figuré, évitant de laisser des trous là où il n'y a pas de figuré à mettre.

4.4.4 Données climatiques

Le programme dessine (cf figure 3.25) les courbes de température et précipitation sur un diagramme à 2 axes y, gradués respectivement en [°C] et en [mm/jour]. Sur x, les durées sont en jours. Le programme choisit automatiquement les extrémités des axes; le paramètre MXP régit le nombre de points pouvant être représentés sur chaque courbe et vaut actuellement 500.

Les données sont lues dans DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT, dont la description est au chapitre V. Le programme n'utilise pas la librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.OLB, n'inclue pas le fichier DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT et les formats d'ecriture y sont contenus. Il est donc autonome du reste du logiciel et peut être facilement utilisé à d'autres fins.

4.5 Modèles

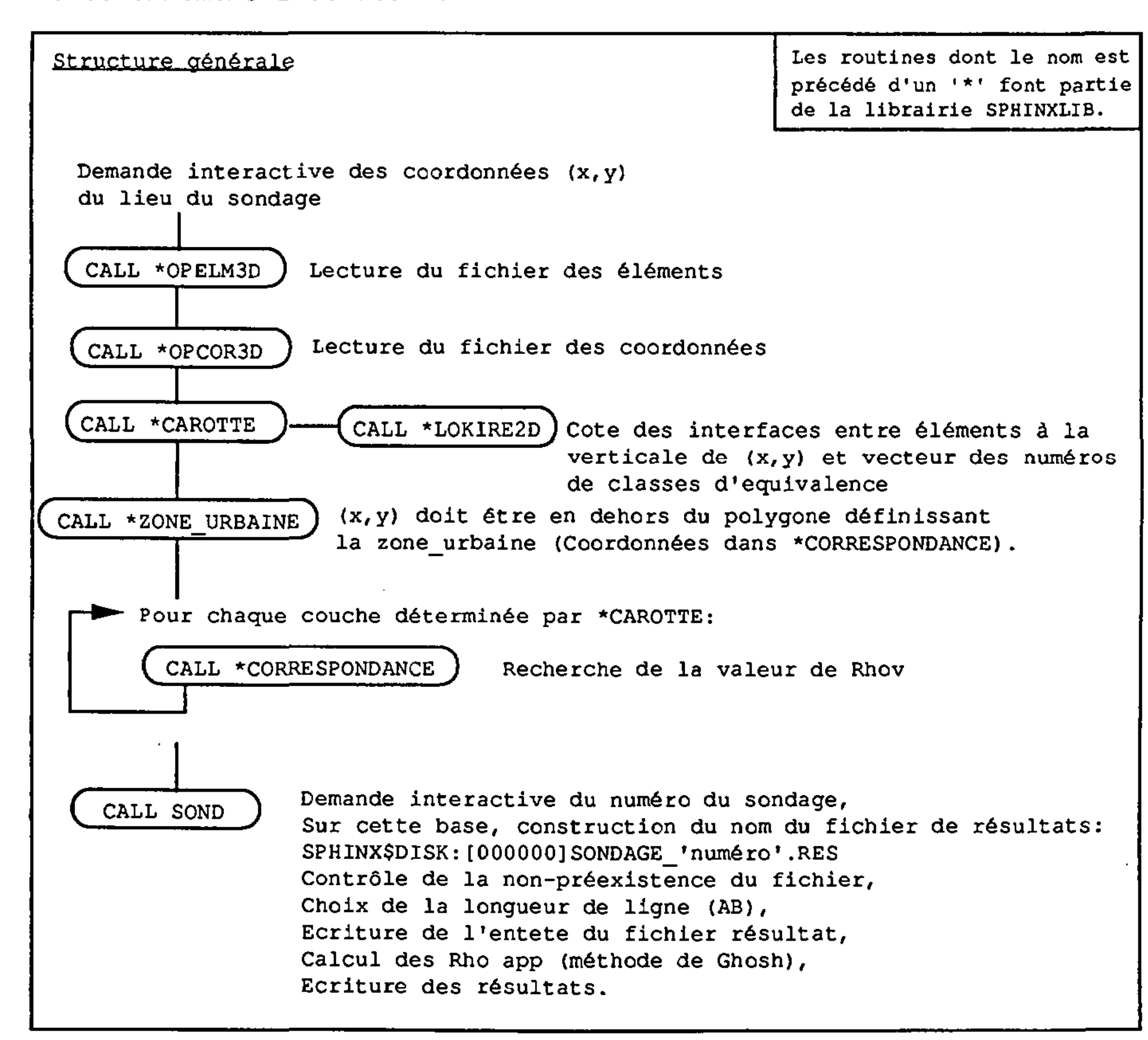
4.5.1 Hydralogie

Modèles d'ETP.
Appel par les procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]21.COM ET 22.COM.
Fonctionnement interactif.

Les programmes THORTHWAITE et TURC n'incluent pas de fichier externe et n'appelent pas de routines contenues dans une librairie. Ils sont donc autonomes et peuvent être utilisés en dehors du cadre du logiciel.
Les formules sont indiquées au § 3.3.3 et les coefficients nécessaires sont tabulés d'après [Brochet et Gerbier, 1968].

4.5.2 Sondages électriques. Programme SONDAGE.

Modèle de sondages électriques.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]31.COM.
Fonctionnement interactif.



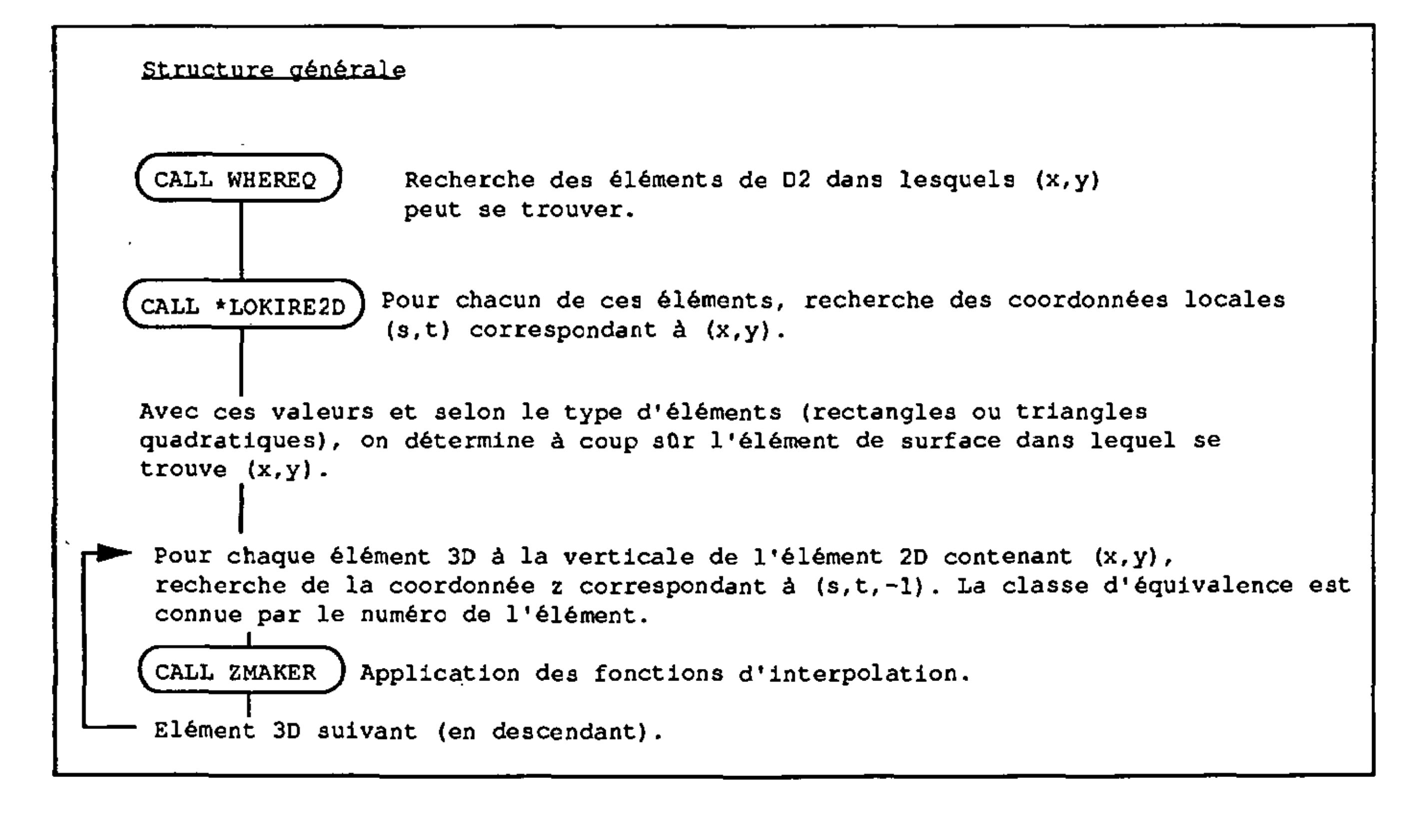
ROUTINE *CAROTTE

La routine CAROTTE est utilisée par les outils de prospection pouvant être appliqués partout sur D2: Sondages et trainés électriques, forages 2" et donc calculs de niveaux d'eau, de rabattement ou de vitesse s'y rapportant.

CAROTTE et HCAROTTE fonctionnent de la même manière et ne présentent de différence que quant à la variable traitée:

- CAROTTE produit le vecteur des cotes des interfaces entre éléments ainsi que le vecteur des classes d'equivalence auxquelles appartiennent ces éléments.
- HCAROTTE produit le vecteur des potentiels hydrauliques ou chimiques aux interfaces entre éléments, ainsi que le vecteur des classes d'equivalence auxquelles appartiennent ces éléments.

La routine fonctionne sur les réseaux d'éléments finis obéissant aux règles de construction de D3 (cf chapitre V); les plus importantes sont ici:
- Les arètes des éléments 3D sont verticales. Ainsi, les coordonnées locales (s,t) correspondant à (x,y) calculées sur l'élément de surface de D2 restent valables dans les éléments sous-jacent de D3. Cela implique que les opérations de sondage ou de forage représentées sont verticales.
- Le nombre d'éléments à la verticale de (x,y) peut varier mais est =< MAXCOUCHES
- Une couche d'éléments bidimensionnels couvre D3
- La numérotation des éléments et des nœuds obéit aux règles en vigueur pour la construction de D3 (cf chapitre V).

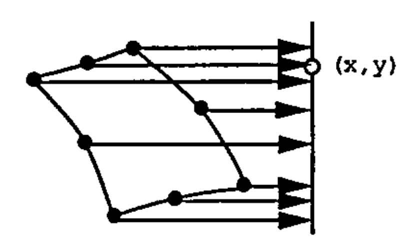


Routine WHEREQ

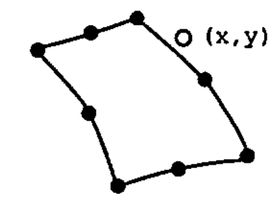
Recherche de la famille des éléments 2D de surface pouvant contenir (x,y)

Principe:

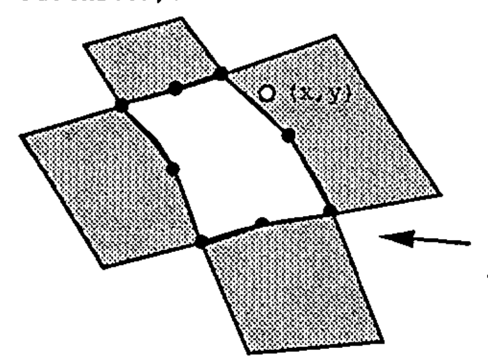
On vérifie que x est < ou > à TOUS les x nodaux pour un élément donné (routine NEAR_X).



Si ce n'est pas le cas, on effectue le même contrôle sur les coordonnées y (routine NEAR_Y): y < y nodaux ou y > y nodaux.
Dans la négative, il est possible que (x,y) se trouve dans l'élément, mais ce n'est pas sûr:



On écrit donc le numéro de l'élément dans la liste des éléments possibles (vecteur MAYBE), et on y ajoute les éléments voisins par une aréte (routine NEIGHBOUR):



(x,y) ne peut pas se trouver dans un élément adjacent par un coin.

Elément suivant

A la fin, MAYBE comporte plusieurs fois les mêmes numéros d'éléments. Le vecteur est trié et compacté (routine COMPRESSLIST).

En procédant ainsi, il est impossible de manquer l'élément dans lequel se trouve (x,y). Le traitement est rapide parce que les fichiers d'éléments et de coordonnées sont déjà en mémoire centrale et que MAYBE, une fois compacté, est en général court. De plus, cette méthode évite de manipuler les fichiers annexes nécessaires à la technique du boxing.

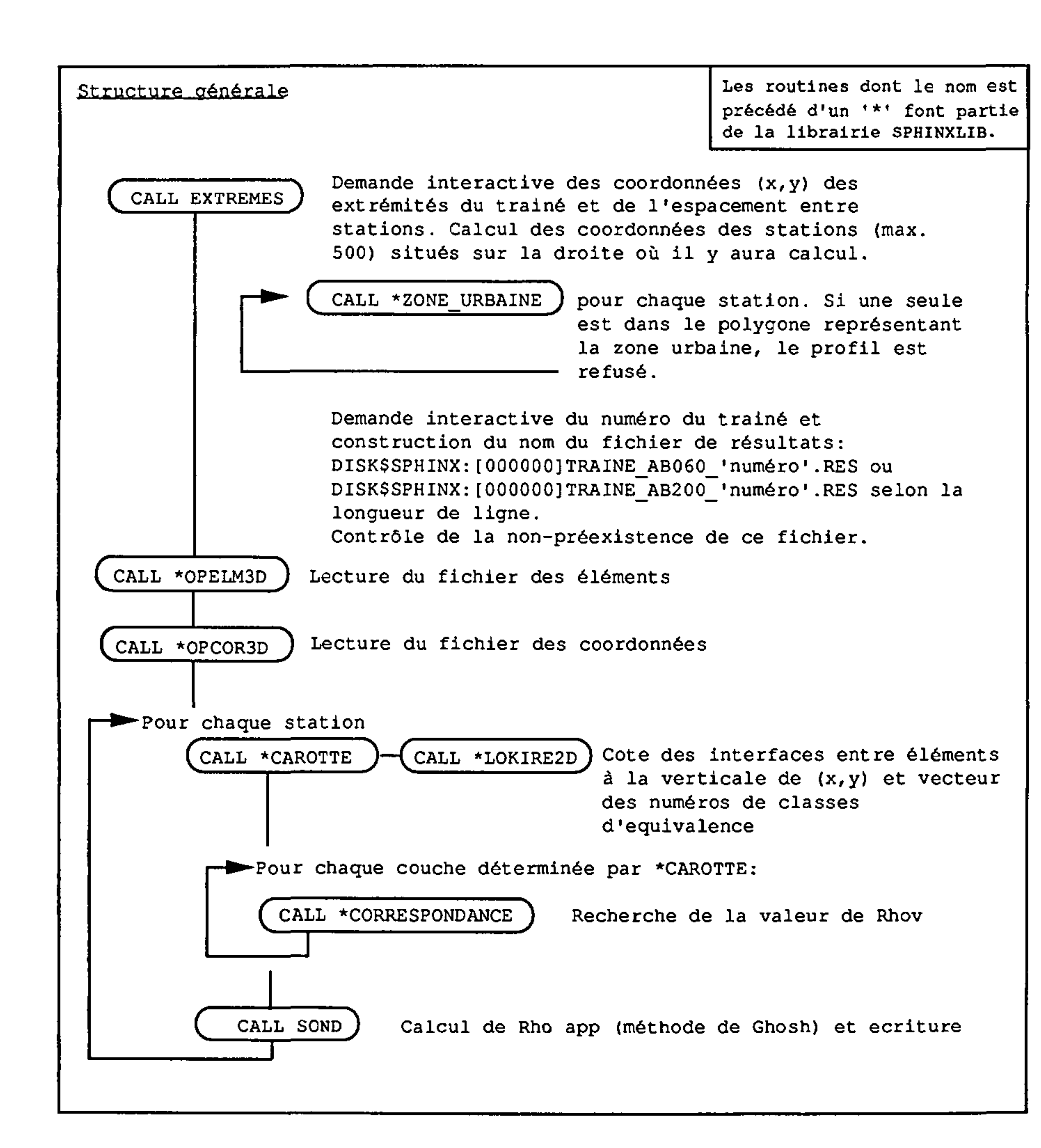
Aprés WHEREQ, la routine LOKIRE2D calcule pour chaque élément dont le numéro figure dans MAYBE, les coordonnées locales (s,t) correspondant à (x,y). LOKIRE2D [Kiraly, 1990] est basée sur le calcul tensoriel.

Connaissant (s,t), on peut regarder, selon le type d'élément, si (x,y) se trouve à l'intérieur:

Pour les triangles, si 0 =< s =< 1 et 0 =< t =< 1 et s+t =< 1
Pour les rectangles, si -1 =< s =< 1 et -1 =< t =< 1

4.5.3 Trainés électriques. Programme TRAINE.

Modèle de trainés électriques.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]32.COM.
Fonctionnement interactif.



4.5.4 Forage destructif 2". Programme FORAGE_2DNS

Modèle de piézomètre d'observation pouvant
être installé en tout (x,y) de D2.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]41.COM.
Fonctionnement interactif.

<u>Structure générale</u>

Les routines dont le nom est précédé d'un '*' font partie de la librairie SPHINXLIB.

Demande interactive des coordonnées (x,y)
du lieu du sondage ainsi que de sa profondeur.

Demande interactive du numéro du sondage,
Sur cette base, construction du nom du fichier de résultats:
SPHINX$DISK:[000000]FORAGE_'numéro'.2INCH
Contrôle de la non-préexistence du fichier.

CALL *OPELM3D — Lecture du fichier des éléments

CALL *OPCOR3D — Lecture du fichier des coordonnées

CALL *CAROTTE — Cote des interfaces entre éléments à la verticale de (x,y) et vecteur des numéros de classes d'equivalence. Vérifie aussi que (x,y) est dans D2.

Ecriture de l'entête du fichier de résultats

CALL SONDLOG — Calcul de la profondeur maximum pouvant être atteinte en frappant 1000 coups:

→ Pour chaque couche, d'épaisseur connue par *CAROTTE

CALL *CORRESPONDANCE — Recherche du nbre de coups/m

La profondeur définitive est
MAX(profondeur voulue, profondeur pouvant être atteinte).

CALL *HCAROTTE — CALL *LOKIRE2D — Vecteur des potentiels hydrauliques aux interfaces entre éléments (couches).

Calcul du niveau d'eau dans le sondage (moyenne des
potentiels pondérée par l'épaisseur et la perméabilité)

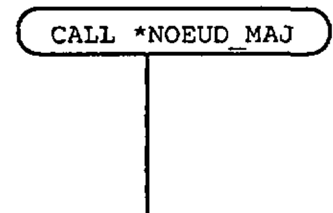
Ecriture du niveau d'eau

4.5.5 Forage destructif 6". Programme FORAGE_6DNS

Modèle de piézomètre d'observation ou de pompage pouvant être installé aux nœuds coins de D2.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]42.COM.
Fonctionnement interactif.

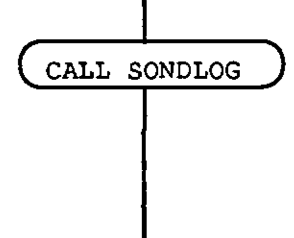
Structure générale

Les routines dont le nom est précédé d'un '*' font partie de la librairie SPHINXLIB.



Demande interactive des coordonnées (x,y) du lieu du sondage,
lecture des fichiers d'éléments et de coordonnées,
recherche et proposition des coordonnées du nœud coin le plus proche.

Demande interactive du numéro du sondage,
Sur cette base, construction du nom du fichier de résultats:
SPHINX$DISK:[000000]FORAGE_'numéro'.DES
Contrôle de la non-préexistence du fichier.



Demande de la profondeur du forage,
stockage du vecteur de la cote z des nœuds situés à la verticale du nœud coin de surface,
stockage du numéro du nœud coin placé immédiatement en dessous de la base de l'ouvrage.

Ecriture de l'entête du fichier de résultat.

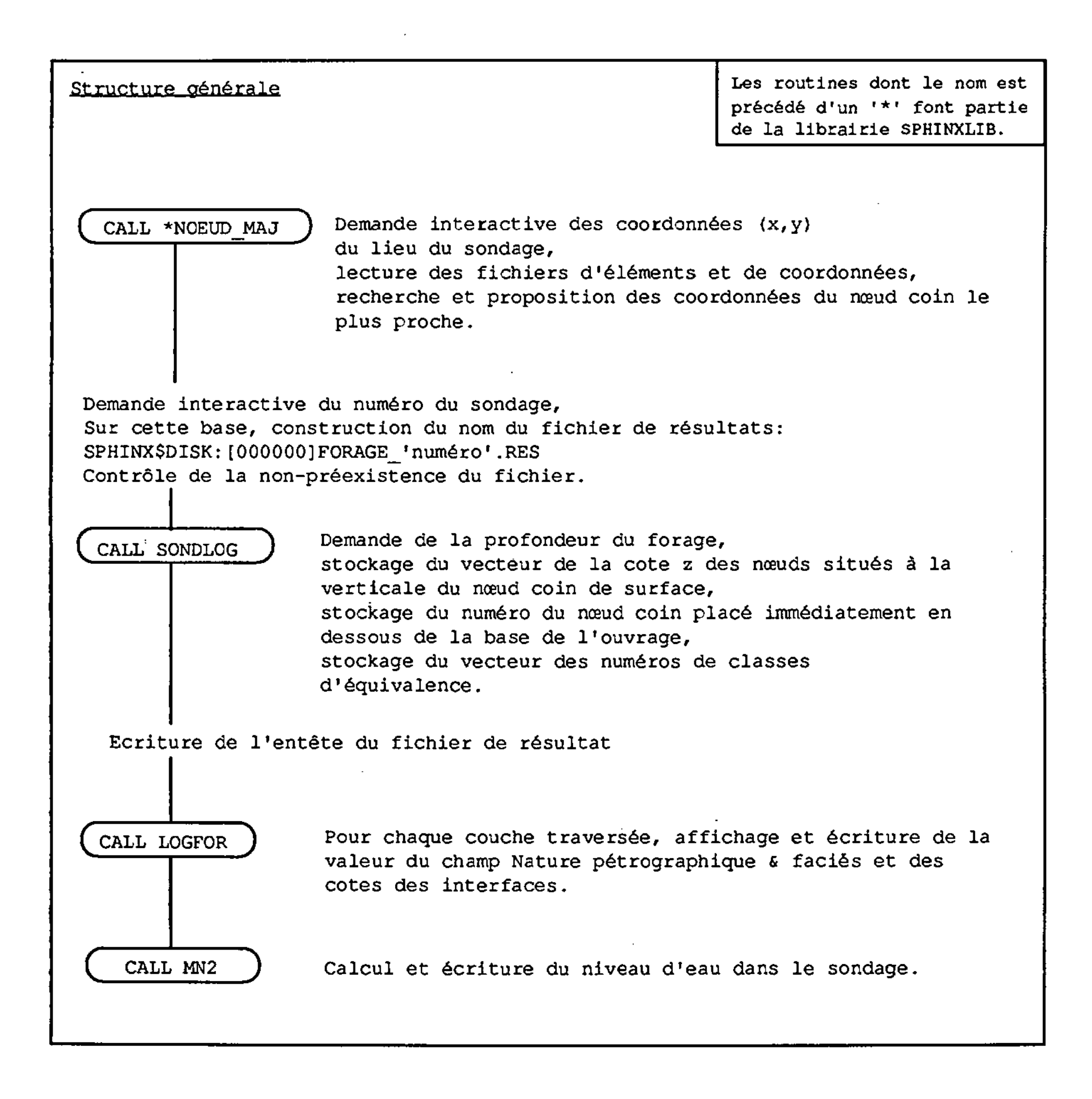


Lecture de DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.RES
Calcul et écriture du niveau d'eau dans le sondage.

NOTE: Les fichiers résultat de sondage mécanique portent tous en première ligne le numéro du nœud coin situé immédiatement sous la base de l'ouvrage. Pour les sondage 2", cette ligne est laissé vide.
Le numéro de nœud est utilisé lors des essais de pompage et de flowmètre (modification du réseau d'éléments finis, introduction de conditions aux limites).

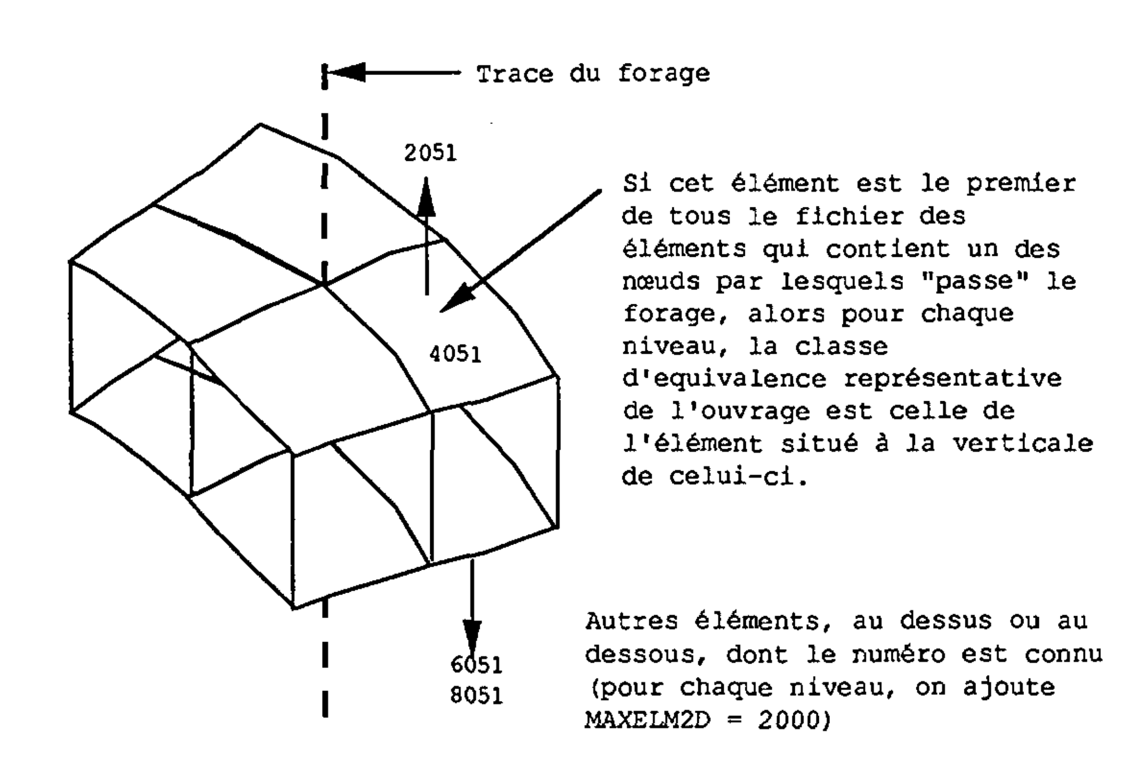
4.5.6 Forage carotté 6" non surveillé. Programme FORAGE_6CNS

Modèle de piézomètre d'observation, de pompage et d'injection de traçeur pouvant être installé aux nœuds coins de D2.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]43.COM.
Fonctionnement interactif.



NOTE: Comment on choisit les classes d'equivalence dans un forage 6".

Les classes d'equivalence permettent de caractériser des éléments. Or, les forages 6" ne sont réalisables qu'à la verticale des nœuds coins de D2, c'est à dire sur les arêtes verticales des éléments de D3. Si, pour une couche donnée, les éléments riverains n'appartiennent pas tous à la même classe, laquelle choisir parmi elles ? Tous les modèles de sondages 6" retiennent la classe des éléments à la verticale du premier élément riverain lu dans le fichier des éléments.



Un tel cas représente une variation latérale de faciès. Si les faciès sont très différents (pincement d'un niveau stratigraphique), l'épaisseur des éléments sera faible.

4.5.7 Forage carotté 6" avec surveillance. Programme FORAGE_6CAS

Modèle de piézomètre d'observation, de pompage et d'injection de traçeur pouvant être installé aux nœuds coins de D2.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]44.COM.
Fonctionnement interactif.

Structure générale

Les routines dont le nom est précédé d'un '*' font partie de la librairie SPHINXLIB.

CALL *NOEUD_MAJ — Demande interactive des coordonnées (x,y) du lieu du sondage, lecture des fichiers d'éléments et de coordonnées, recherche et proposition des coordonnées du nœud coin le plus proche.

Demande interactive du numéro du sondage,
Sur cette base, construction du nom des fichiers de résultats:
SPHINX$DISK:[000000]FORAGE_'numéro'.RES et
SPHINX$DISK:[000000]POTENTIEL_'numéro'.RES
Contrôle de la non-préexistence de ces fichiers.

CALL HVEC — Lecture du fichier DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.RES (potentiels dans D3 à l'état de repos) et construction du vecteur des potentiels (POTP) aux nœuds coins de la verticale du nœud de surface (NICOPS), sur toute l'épaisseur de D3.

CALL SONDLOG — Construction du vecteur des classes d'equivalence sur toute l'épaisseur de D3 en (x,y), stockage du vecteur de la cote z des nœuds coins situés à la verticale du nœud coin de surface.

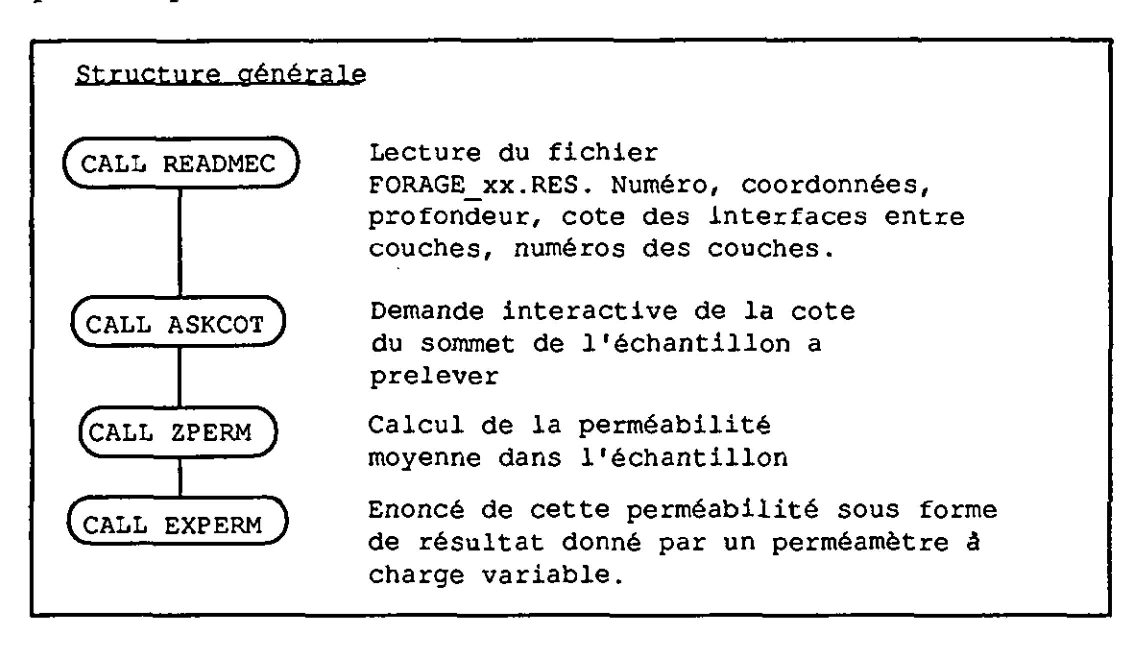
CALL INTERPOLE — Calcul du vecteur des potentiels hydrauliques tous les 2 m (POT2), par interpolation

Progression 2 m par 2 m, à la demande de l'utilisateur
A chaque étape, affichage et écriture du potentiel hydaulique à la profondeur atteinte, ainsi que de la valeur du champ Nature pétrographique & faciès.
La recherche des niveaux traversés se fait de la même manière que pour le perméamètre à charge variable (cf § 4.5.8)

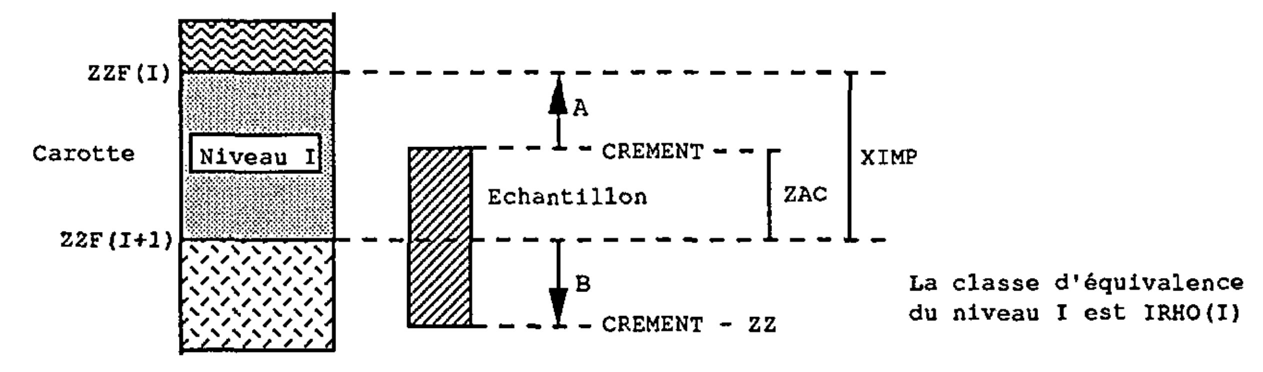
CALL WRITEFILE — Calcul du niveau d'eau dans le sondage, Ecriture des fichiers de résultat.

4.5.8 Perméamètre à charge variable. Programme PERMEAMETRE

Détermination indirecte de la composante verticale du champ Perméabilité
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]45.COM



Fonctionnement de la routine ZPERM



L'intersection (ZAC) de l'échantillon et du niveau éxaminé correspond à un des cas:

A	>0	<0	<0	>0	>0	<0
B	>0	>0	>0	<0	<0	<0
ZAC	>0	>0	<0	>0	<0	>0

et vaut: ZAC = XIMP - A - B (XIMP est l'épaisseur du niveau)

avec
- A=0 si A<0,
- B=0 si B<0,
- ZAC=0 si ZAC<0

```
C       On ecrit:
        DO 10 I=1,NBCOUCHES
         A=ZZF(I)-CREMENT
         B=(CREMENT-ZZ)-ZZF(I+1)
         XIMP=ZZF(I)-ZZF(I+1)
         IF(A.LT.0.)A=0.
         IF(B.LT.0.)B=0.
         ZAC=XIMP-A-B
         IF(ZAC.LT.0.)ZAC=0.
         CALL CORRESPONDANCE(IRHO(I),LEGTXT,PERM,STO,VALRHO,FROTT,
       & ISTYL,INTS)

         PERPUITS=PERPUITS+(ZAC/ZZ)*PERM(6)

 10     CONTINUE
```

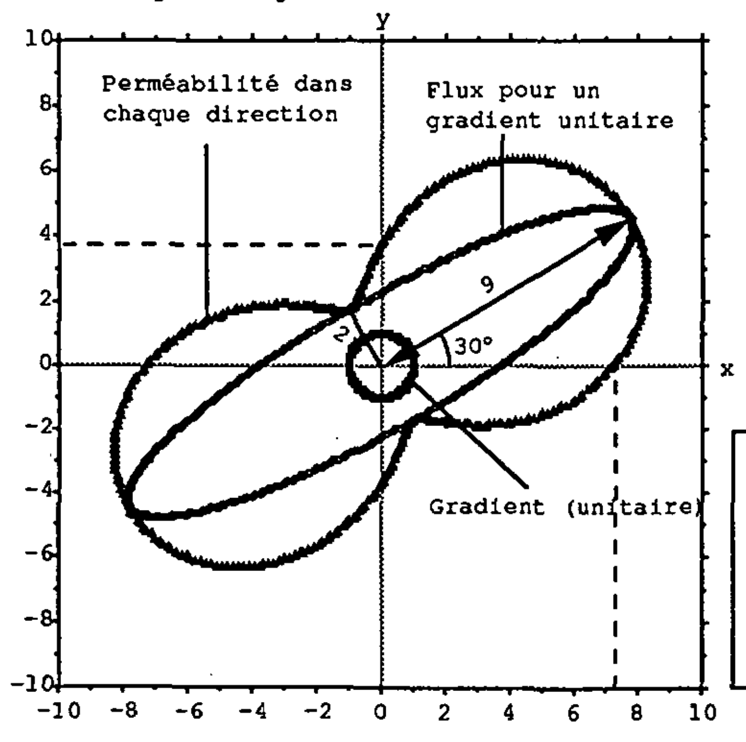
Illustration du fait que le tenseur de perméabilité [K] donne directement la valeur de K sur les axes du référentiel géometrique.

Soit , en 2 dimensions, les perméabilités directionnelles $\begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}$

Ce sont les perméabilités principales, orthogonales entre elles. Choisissons un angle de 30° entre la droite portant K1 et l'axe X. On peut montrer [Neuman, 1984] que le tenseur de perméabilité [K] vaut alors:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.25 & 3.03 \\ 3.03 & 3.75 \end{bmatrix}$$

Relations entre perméabilité directionnelle et flux pour un gredient donné.



La diagonale de [K] donne les valeurs de K sur les axes x et y, soit 7.25 et 3.75. On peut lire ces valeurs sur le graphique ci-contre.

Dans SPHINX, c'est le tenseur qui est stocké. En 3D, il se présente comme suit:

$$\begin{bmatrix} K_{xx} K_{xy} K_{xz} \\ K_{yx} K_{yy} K_{yz} \\ K_{zx} K_{zy} K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{PERM(1)} & \text{PERM(2)} & \text{PERM(4)} \\ & \text{PERM(3)} & \text{PERM(5)} \\ & & \text{PERM(6)} \end{bmatrix}$$

Donc:
Puisque les échantillons du perméamétre sont recueillis dans des forages qui sont verticaux, le programme ne fait que lire la valeur de K selon z, Kzz, et aucun calcul n'est nécessaire.

4.5.9 Essais de pompage longue durée

Plusieurs procédures et programmes sont utilisés. Le fonctionnement est globalement le suivant:

Procédure appelante: DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51.COM
(Traitement interactif)

- Contrôle préliminaire de l'heure; l'accès est réfusé après 12 h, chaque jour, pour éviter les perturbations éventuelles liées à l'effacement du disque temporaire SCRATCH$SPHINX:[000000], à 06 h sur NEDCU0::.

- Choix du piézomètre 6" dans lequel l'essai doit avoir lieu.

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]PREPOMPAGE.
  Rappel des paramètres du forage, demande du débit à imposer et ecriture éventuelle (cf PREPOMPAGE) de ces informations dans SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.INQ, si le niveau d'eau est > à la cote du fond de l'ouvrage.

- Tentative d'ouverture du fichier SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.INQ. En cas d'echec, interruption du traitement.

- Construction du nom du fichier des résultats:
  SPHINX$DISK:[000000]'participant'-'date'.TPZ_'i'
  ($i^{ème}$ essai de la journée)
  Affichage de ce nom.

- Soumission des procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51A.COM
  puis DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51B.COM

- Sortie forcée du logiciel

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51A.COM (Traitement par lots).

- Redéfinition des noms logiques: Noms des disques et de l'utilisateur.

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]MODI_RESEAU
  Affinage du réseau EF autour du forage choisi:
  - création des fichiers SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.ELM
    SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.COR
  - création du fichier de paramètres incluant la condition de débit imposée par l'utilisateur: SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.PAR
- Sortie

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51B.COM (Traitement par lots).

- Assignation des fichiers en vue de la construction du modèle hydraulique à l'état 1 (Réseau EF modifié, fichier de paramètres standard DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR).

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique à l'état 1

- Assignation des fichiers en vue de la construction du modèle hydraulique à l'état 2 (Le fichier de paramètres est SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.PAR

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique à l'état 2.

- Ecriture de la liste des piézomètres où il faudra calculer le rabattement (nom des fichier résultat de forage) dans SCRATCH$SPHINX:[000000]FORAGE_'participant'.LIS

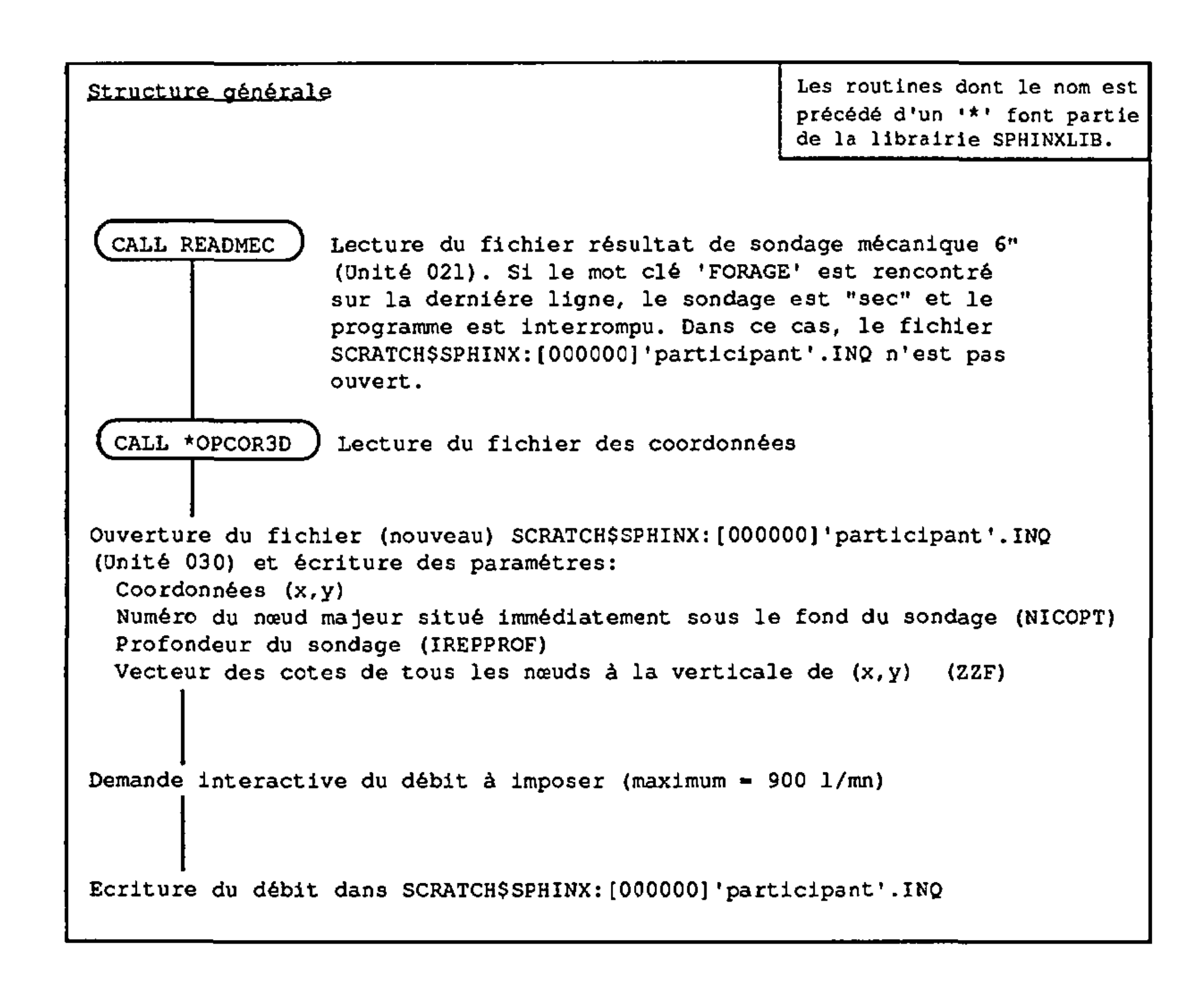
- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]TOURNEE_HP
  A partir des états 1 et 2 calcul des rabattements dans tous les piézomètres et écriture des résultats.

- Sortie

On décrit ci-dessous les programmes PREPOMPAGE, MODI_RESEAU et TOURNEE_HP.

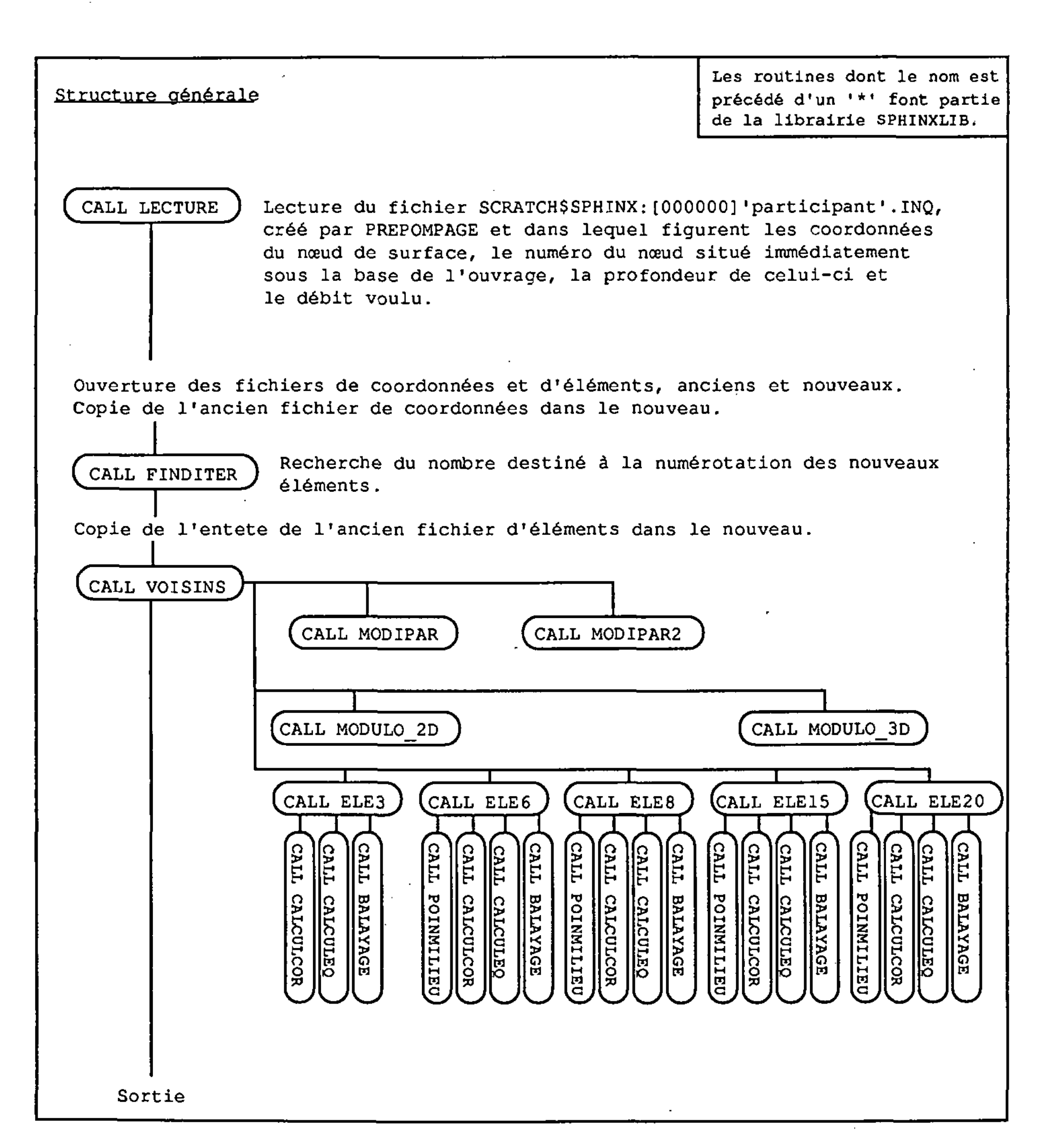
Programme PREPOMPAGE

Acquisition des paramètres nécessaires au programme MODI_RESEAU.
Utilisé pour toutes opérations de pompage et flowmètre.
Appel par les procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51.COM, 52.COM et 53.COM.
Fonctionnement interactif.



Programme MODI_RESEAU

Affinage du réseau d'éléments finis au voisinage d'un nœud à débit imposé par l'utilisateur et ajout d'éléments 1D verticaux.
Utilisé pour toutes opérations de pompage et flowmétre.
Appel par les procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51A.COM, 52A.COM et 53A.COM.
Traité par lots.



Fonctionnement de la routine VOISINS

```
┌Lecture d'un élément dans DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.ELM
│ISTAT = 0      Pointeur pour entreprendre éventuellement les modifications.
│
│ ┌Pour chacun des nœuds LVB(i) constituant cet élément
│ │
│ │ ┌Pour tous les nœuds NICOPS+MAXELM2D*j situés à la verticale du piézomètre
│ │ │
│ │ │   Si LVB(i) = NICOPS+MAXELM2D*j  (L'élément possède un nœud sur le piézomètre)
│ │ │     ISTAT = 1   Il faudra modifier cet élément
│ │ │     INDE est la position du nœud dans le vecteur LVB
│ │ │     INDE vaut i pour les éléments 2D
│ │ │     INDE vaut la position du premier multiple rencontré de NICOPS+MAXELM2D
│ │ │          dans LVB pour les éléments 3D. Ce nœud est ainsi situé sur la face
│ │ │          inférieure de l'élément.
```



```
│ │ └Nœud suivant
│ │
│ └Nœud suivant
│
│  Si il faut modifier l'élément (ISTAT ≠ 0)
│
│    Si c'est le premier élément de tout le fichier qu'il faut modifier (ITT=0)
│      Ecriture de tous les éléments 1D représentant le piézométre. Les classes de
│      K et S pour ces éléments sont: MAXCOUCHES pour les nouveaux éléments 1D, à
│                                     l'exception du plus bas,
│                                     MAXCOUCHES-1 pour le plus bas (K et S obtenus
│                                     par pondération (cf xxx).
│      CALL MODIPAR  Calcul de K et S pour la classe MAXCOUCHES-1 et écriture dans le
│                    nouveau fichier des paramètres SCRATCH$SPHINX:[000000]'P1'.PAR
│      CALL MODIPAR2 Idem pour cas particulier où le fond du piézo coïncide avec un
│                    nœud majeur. La classe MAXCOUCHES-1 est alors inutile.
│      ITT=1
│
│    Fin de Si
│
│    Modifications des éléments, selon leur type:
│      CALL MODULO_2D, CALL ELE3       Segments 1D
│      CALL MODULO_2D, CALL ELE6       Triangles 2D
│      CALL MODULO_2D, CALL ELE8       Rectangles 2D
│      CALL MODULO_3D, CALL ELE15      Prisme triangulaires 3D
│      CALL MODULO_3D, CALL ELE20      Parallépipèdes 3D
│
│  Sinon
│
│    Ecriture de l'élément, non modifié
│  Fin de Si
└Elément suivant
```

Les routines MODULO_2D et MODULO_3D réécrivent le vecteur LVB en mettant en première position le nœud repéré par la variable INDE

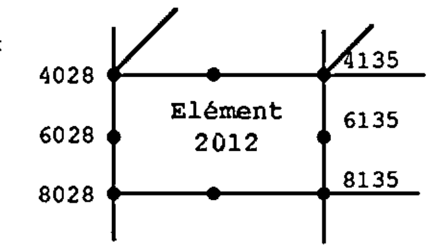
Exemple:
INDE = 5   Nombre de nœouds = KR = 15

LVB input :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	0	0	0	0	0
LVB output:	5	6	1	2	3	4	9	7	8	14	15	10	11	12	13	0	0	0	0	0

Fonctionnement de la routine FINDITER

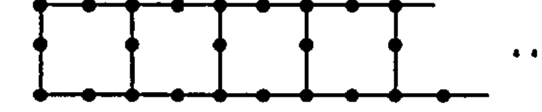
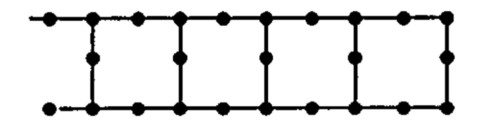
Préliminaire: Pour chaque niveau i de nœuds, les numéros peuvent être compris entre 2000*i + 1 à 2000*(i+1)
Pour chaque niveau j d'éléments 3D (incluant 3 niveaux de nœuds), les numéros vont de 2000*(j-1) à 2000*j;   (2000=MAXELM2D).

Exemple:



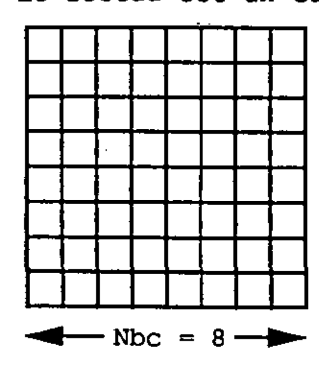
En pratique, on n'utilise jamais les 2000 numéros d'éléments à disposition. Si il existe 2000 nœuds pour un niveau de nœuds donné, on ne peut pas créer 2000 éléments. Cela signifie que pour un niveau d'éléments donné, le vecteur contenant leurs numéros est en grande partie vide. Cherchons dans un exemple 2D le nombre de nœuds nécessaires pour construire un réseau contenant un nombre donné d'éléments rectangulaires quadratiques, et examinons 2 cas extrémes;

- Les éléments sont tous alignés:

 ... 

Dans ce cas, Nombre de nœuds = Nombre d'éléments*5 + 3 et avec 2000 nœuds on peut construire 399 éléments.

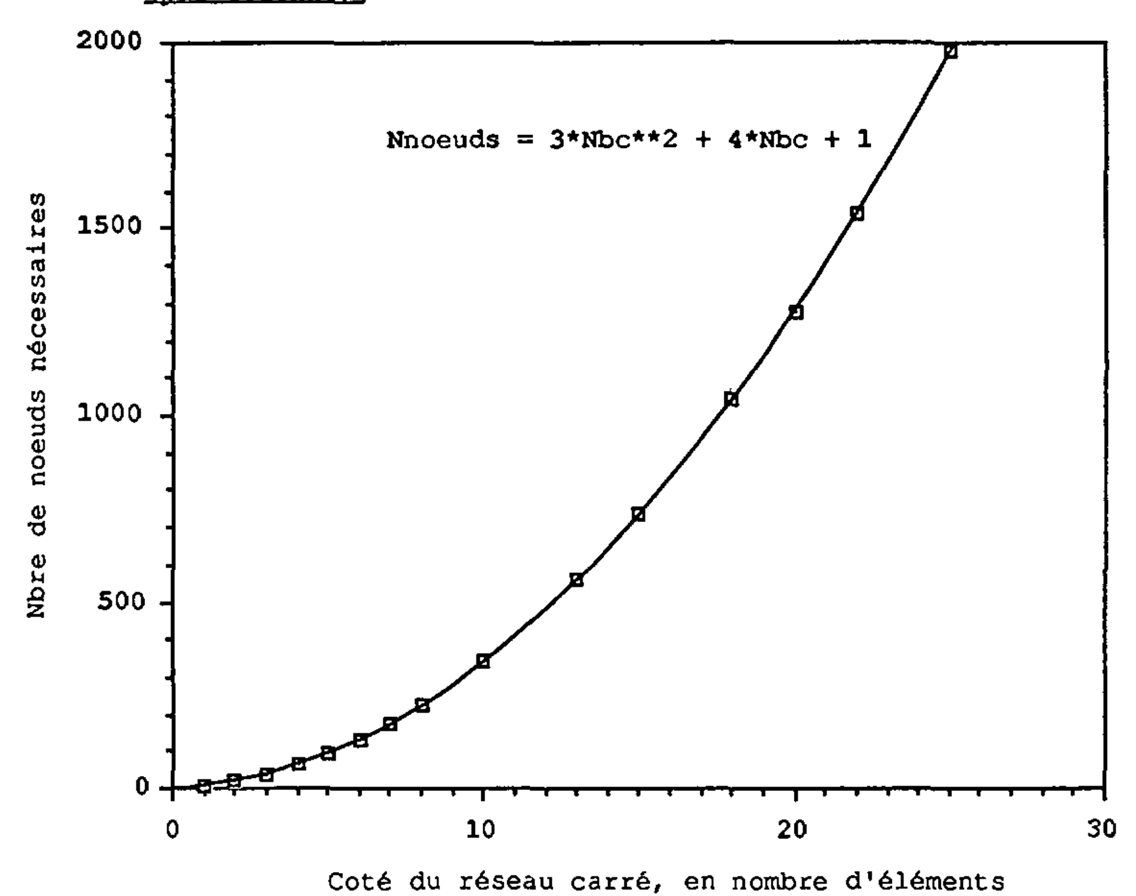
- Le réseau est un carré



Dans ce cas, Nombre de nœuds = 3*Nbc**2 + 4*Nbc +1
Avec Nbc = Nombre d'éléments par ligne du réseau.

Cette forme est la plus défavorable pour le nombre d'éléments nécessaires. Avec 2000 noœuds, on construira un réseau carré de 25 x 25 = 625 éléments.

Nombre de nœuds nécessaires à un réseau d'éléments finis carré.
Les éléments sont 2D quadratiques rectangulaire (sans nœud au centre).
La dimension du réseau est donnée par le nombre d'éléments par ligne (par colonne).



Si le réseau comporte des triangles, le nombre d'éléments augmente. Dans tous les cas, il est peut probable que le nombre d'éléments en partie constitués d'un niveau de 2000 nœuds soit plus grand que 980. Il ne faut pas qu'un élément de surface initial porte un numéro plus grand que 980.
C'est une condition de fonctionnement du logiciel

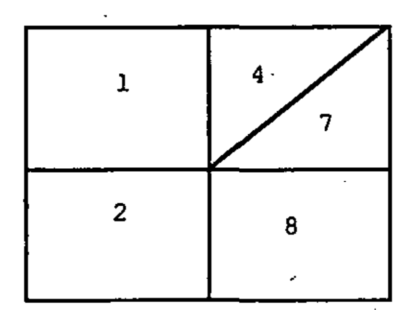
Numéros d'éléments autorisés dans le réseau initial: 10023, 13979
Numéros interdits: 980, 12991, 2000

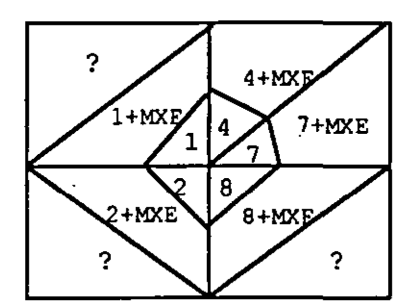
Donc, sur les 2000 places disponibles par niveau d'élément, seules les 979 premières sont occupées. Cela concerne les numéros des éléments et à fortiori leur nombre. Ainsi, pour avoir 979 éléments par niveau, il ne faut pas qu'il y ait de "trou" dans la numérotation.

La place disponible est utilisée pour donner des numéros aux éléments nouveaux créés par MODI_RESEAU, tout en respectant le fait de pouvoir caractériser un niveau par les numéros des éléments qui le composent.

- La modification d'un élément à 3, 6 ou 15 nœuds, produit 2 éléments nouveaux dont l'un porte le numéro N et l'autre le numéro N+MXE (MXE=1000). N+MXE <2000.
- La modification d'éléments à base carrée (8 et 20 nœuds) produit 3 éléments nouveaux. Les numéros des 2 premiers sont comme précedemment N et N+MXE.
  Par exemple, pour le premier niveau d'éléments, $0 < N < 980$
  $1000 < N+MXE < 1980$

La numérotation du troisième élément pose un problème, que résoud la routine FINDITER.
On l'illustre sur l'exemple suivant; Soit à modifier le réseau initial:



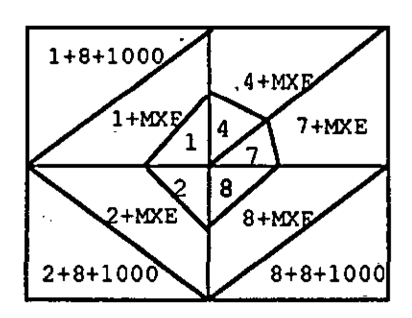


Pour donner les numéros manquants, on cherche le plus petit entier INCR tel qu'en ajoutant ce nombre au numéros des éléments riverains du nœud autour duquel on modifie le réseau, on obtienne des numéros tous différents des numéros préexistant.

Dans cet exemple:

Numéros initiaux:		1	2	4	7	8
Pour INCR=1,	Numéro + INCR =	2	3	5	8	9
INCR=2		3	4	6	9	10
INCR=3		4	5	7	10	11
INCR=4		5	6	8	11	12
INCR=5		6	7	9	12	13
INCR=6		7	8	10	13	14
INCR=7		8	9	11	14	15
INCR=8		9	10	12	15	16

<-- En ajoutant 8 aux numéros initiaux, on obtient des numéros tous différents des anciens. Les numéros manquant d'éléments sont obtenus en ajoutant en plus MXE. On obtient finalement:



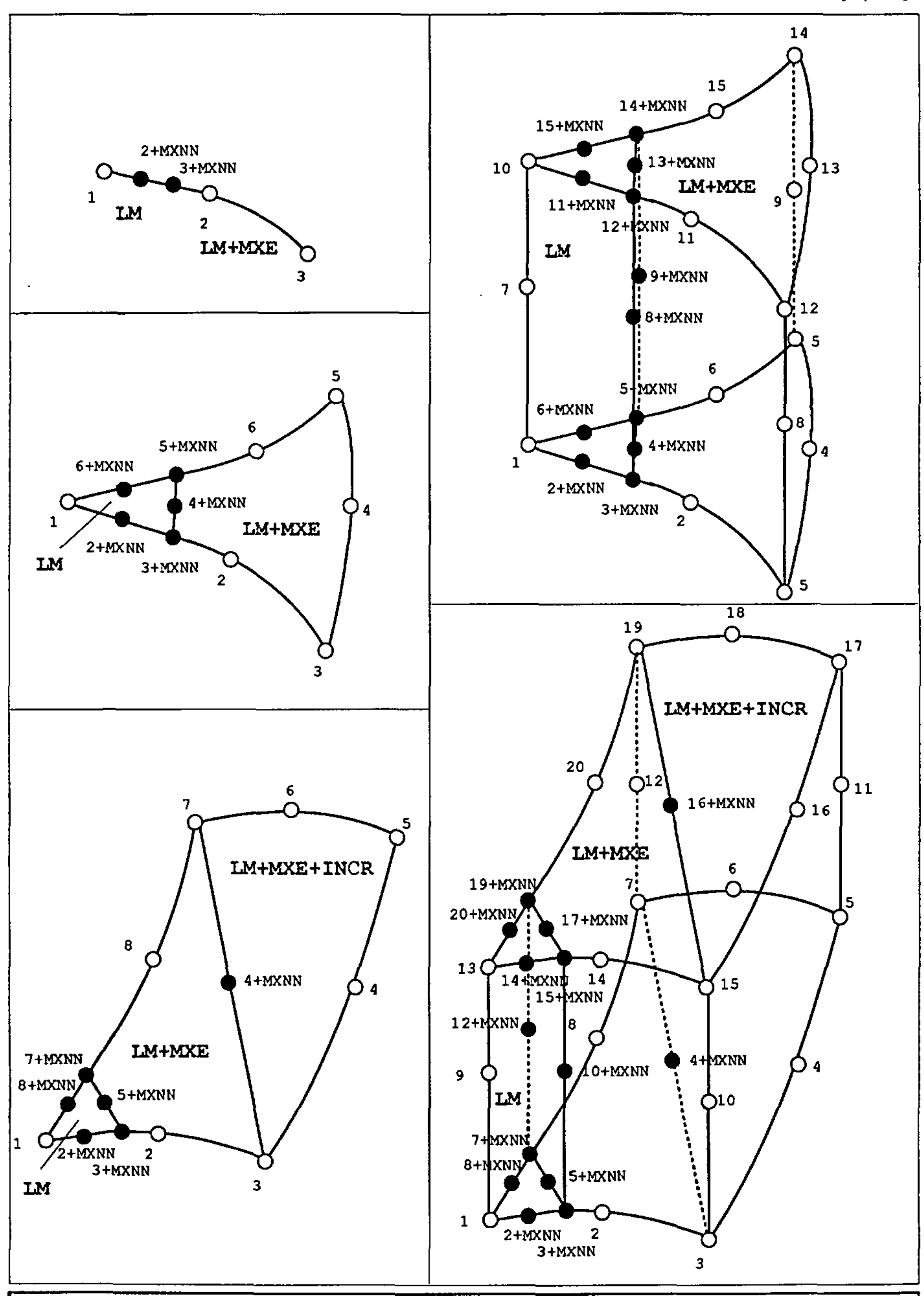
Si le nœud autour duquel on modifie le réseau n'appartient pas à plus de 20 éléments (en projection 2D sur (x,y)), alors INCR est < 21 et on est sûr que les numeros d'éléments, anciens et nouveaux, sont tous différents entre eux et sont < 2000.

Chaque nœud de surface du réseau appartient au plus à 20 éléments 2D en plan.
<u>C'est une condition de fonctionnement du logiciel</u>

INCR est utilisée aussi pour les autres niveaux.

Les éléments riverains du forage où l'utilisateur impose un débit sont modifiés comme suit(résultat du traitement par MODI_RESEAU):

MXNN = MAXCOUCHES*2*MAXELM2D+MAXELM2D ; MXE = 1000 ; INCR = [1,20]



Programme MODI_RESEAU: Principe de numérotation des nœuds et des éléments.

LM :Numéro initial de l'élément.

○ :Nœud initialement présent et numéro.

● :Nœud ajouté et numéro.

Programme TOURNEE_HP

Calcul du rabattement dans les piézomètres 2" et 6" lors d'un essai de pompage de longue durée.
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51B.COM

Structure générale

Les routines dont le nom est précédé d'un '*' font partie de la librairie SPHINXLIB.

Ouverture du fichier de résultats:
SPHINX$DISK:[000000]'participant'-'date'.TPZ_'i'
(le nom est défini par la procédure appelante)

CALL *OPELM3D — Lecture du fichier des éléments (modifié)

CALL *OPCOR3D — Lecture du fichier des coordonnées (modifié)

Lecture du fichier de résultat du modéle hydraulique sans condition de débit (Etat 1).
SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.RES

Lecture du fichier de résultat du modèle hydraulique avec condition de débit (Etat 2).
SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.RES_P

→ Lecture d'une ligne de la liste des forages dans
SCRATCH$SPHINX:[000000]FORAGE_'participant'.LIS

Lecture du fichier forage correspondant (numéro, coordonnées (x,y), profondeur)

Cas du forage 2" (La première ligne du fichier est vide)

CALL *CAROTTE — Vecteur des cotes des interfaces entre éléments au droit de (x,y)

CALL LOC CAR — Vecteur des potentiels hydrauliques aux interfaces entre éléments à la verticale de (x,y) pour l'état initial (sans pompage)

CALL LOC_CAR — Idem pour l'état avec pompage.

Calcul du niveau d'eau pour les 2 états et soustraction -> rabattement

Cas du forage 6" (La première ligne du fichier comporte le numéro du nœud situé immédiatement sous la base du forage)

Calcul du niveau d'eau pour les 2 états, directement d'aprés les potentiels nodaux, et soustraction -> rabattement.

Ecriture du rabattement dans le fichier résultat

Forage suivant

Fonctionnement de la routine LOC_CAR

La seule différence avec HCAROTTE est de ne pas ouvrir et lire le fichier résultat du modéle hydrodynamique (état initial ou final). Cela doit être fait avant d'appeler la routine. En utilsant HCAROTTE, il faudrait ainsi ouvrir et lire les fichiers autant de fois qu'il y a de piézomètres, ce qui est inutile.

Les fonctions de cette routine sont globalement les suivantes:

- Rechercher à quel élément 2D de surface appartient un point (x,y) quelconque,
- Rechercher les coordonnées locales correspondant à (x,y) dans l'élément,
- En utilisant les coordonnées réelles des nœuds et les fonctions d'interpolation décrivant la fonction potentiel, calculer les potentiels hydrauliques aux limites entre couches d'éléments (la coordonnée locale sur l'axe verticale est connue: -1, les coordonnées locales dans le plan horizontal sont identiques partout sur la colonne d'éléments 3D puisque les arètes sont verticales).

Pour le détail du fonctionnement, se reporter à la description de CAROTTE (cf § 4.5.2).

4.5.10 Essais de pompage de durée limitée

Le fonctionnement est globalement le suivant:

Procédure appelante: DISK$SPHINX:[PROCEDURES]52.COM
(Traitement interactif)

- Contrôle préliminaire de l'heure; l'accès est réfusé après 12 h, chaque jour, pour éviter les perturbations éventuelles liées à l'effacement du disque temporaire SCRATCH$SPHINX:[000000], à 06 h sur NEDCU0::.

- Choix du piézomètre 6" dans lequel l'essai doit avoir lieu.

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]PREPOMPAGE.
  Rappel des paramètres du forage, demande du débit à imposer et ecriture éventuelle (cf PREPOMPAGE) de ces informations dans SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.INQ, si le potentiel hydraulique au nœud sommet est > à la cote du fond de l'ouvrage.

- Tentative d'ouverture du fichier SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.INQ. En cas d'echec, interruption du traitement.

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]MKTRAN
  Introduction du plan d'échantillonage

- Construction du nom du fichier des résultats:
  SPHINX$DISK:[000000]'participant'-'date'.TPZ_'i'
  ($i^{ème}$ essai de la journée)
  Affichage de ce nom.

- Soumission des procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]52A.COM
  puis DISK$SPHINX:[PROCEDURES]52B.COM

- Sortie forcée du logiciel.

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]52A.COM (Traitement par lots).

- Redéfinition des noms logiques: Noms des disques et de l'utilisateur.
- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]MODI_RESEAU
  Affinage du réseau EF autour du forage choisi, création du fichier de paramètres en incluant la condition de débit imposée par l'utilisateur: SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.PAR
- Sortie

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]52B.COM (Traitement par lots).

- Assignation des fichiers en vue de la construction du modèle hydraulique avec le réseau EF modifié et le fichier de paramètres standard DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR.

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique qui constitue les conditions initiales pour la première période transitoire.

$A1:

- RUN DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]FEN2
  Pour la premère période transitoire:
    Fichier de paramètres: SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.PAR
    Fichier de conditions initiales: calculé ci -dessus par FEN1
        SPHINX$SCRATCH:[000000]'participant'.RES_P
    Fichier des paramètres transitoires:
        SPHINX$SCRATCH:[000000]FOR100.TRA_'participant'
  Pour les périodes suivantes:
    Fichier de paramétres identique,
    Fichier de conditions initiales: Résultat de la période transitoire
        précédente: SPHINX$SCRATCH:[000000]'participant'_'x'.RES_T
    Fichier des paramètres transitoires:
        SPHINX$SCRATCH:[000000]FOR10'x'.TRA_'participant'
        ou x est le numéro de la période simulée.

- RUN DISK$SPHINX:[000000]TOURNEE_HT
  Calcul des rabattements et écriture dans le fichier résultat
  SPHINX$DISK:[000000]'participant'-'date'.TPZ_'i'
  ($i^{ème}$ essai de la journée)

- GOTO A1

- Sortie

TOURNEE_HT est une adaptation de TOURNEE_HP au cas du régime transitoire. On décrit ci-dessous le programme MKTRAN.

Programme MKTRAN

Acquisition du plan d'échantillonage (temps auxquels on calcule et écrit le rabattement dans les piézomètres).

Le nombre de périodes est au minimum 7 et au maximum 20. Pour chacune, un fichier nouveau est créé, qui contient le temps [s] initial et final. Ces fichiers sont utilisés ultérieurement par le modèle hydraulique.

Du point de vue de l'utilisateur, les unités admises sont seconde, minute, heure et jour. Les valeurs introduites sont contrôlées et triées.

Le nom des fichiers créés est le suivant:
SPHINX$SCRATCH:[000000]FOR'x'.TRA_'participant'
où x = 100 + numéro de la période - 1
Exemple: SPHINX$SCRATCH:[000000]FOR103.TRA_'participant' pour la 4ème période.

4.5.11 Flowmètre

Le modèle de flowmètre est élaboré par plusieurs procédures et programmes.

Procédure appelante: DISK$SPHINX:[PROCEDURES]53.COM
(Traitement interactif)

- Contrôle préliminaire de l'heure; l'accès est réfusé après 12 h, chaque
  jour, pour éviter les perturbations éventuelles liées à l'effacement du
  disque temporaire SCRATCH$SPHINX:[000000], à 06 h sur NEDCU0::.

- Choix du piézomètre 4" dans lequel l'essai doit avoir lieu.

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]PREPOMPAGE.
  Rappel des paramètres du forage, demande du débit à imposer et ecriture
  de ces informations dans SCRATCH$SPHINX:[000000]'participant'.INQ
  Vérifie que le potentiel hydraulique au nœud sommet est > à la cote du
  fond de l'ouvrage.

- Construction du nom du fichier des résultats:
  SPHINX$DISK:[000000]'participant'-'date'.FLW_'i'
  ($i^{ème}$ essai de la journée)
  Affichage de ce nom.

- Appel des procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]53A.COM
  puis DISK$SPHINX:[PROCEDURES]53B.COM

- Sortie

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]53A.COM (Traitement par lots).

- Redéfinition des noms logiques: Noms des disques et de l'utilisateur.

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]MODI_RESEAU

- Sortie

Procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]53B.COM (Traitement par lots).

- Assignation des fichiers en vue de la construction du modèle
  hydraulique à l'état 1 (cf § 3.3.13).

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique à l'état 1

- Assignation des fichiers en vue de la construction du modèle hydraulique à l'état 2

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique à l'état 2.

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]PREFLOWMETRE
  Lecture dans l'état 2 du potentiel dans le piézomètre et modification du fichier de paramètres en imposant ce potentiel à tous les noeuds du puits, suppression de la condition de debit en NICOPT (nœud supérieur).

- Assignation des fichiers issus de PREFLOWMETRE en vue de la construction du modèle hydraulique à l'état 3.

- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]FEN1
  Construction du modèle hydraulique à l'état 3.

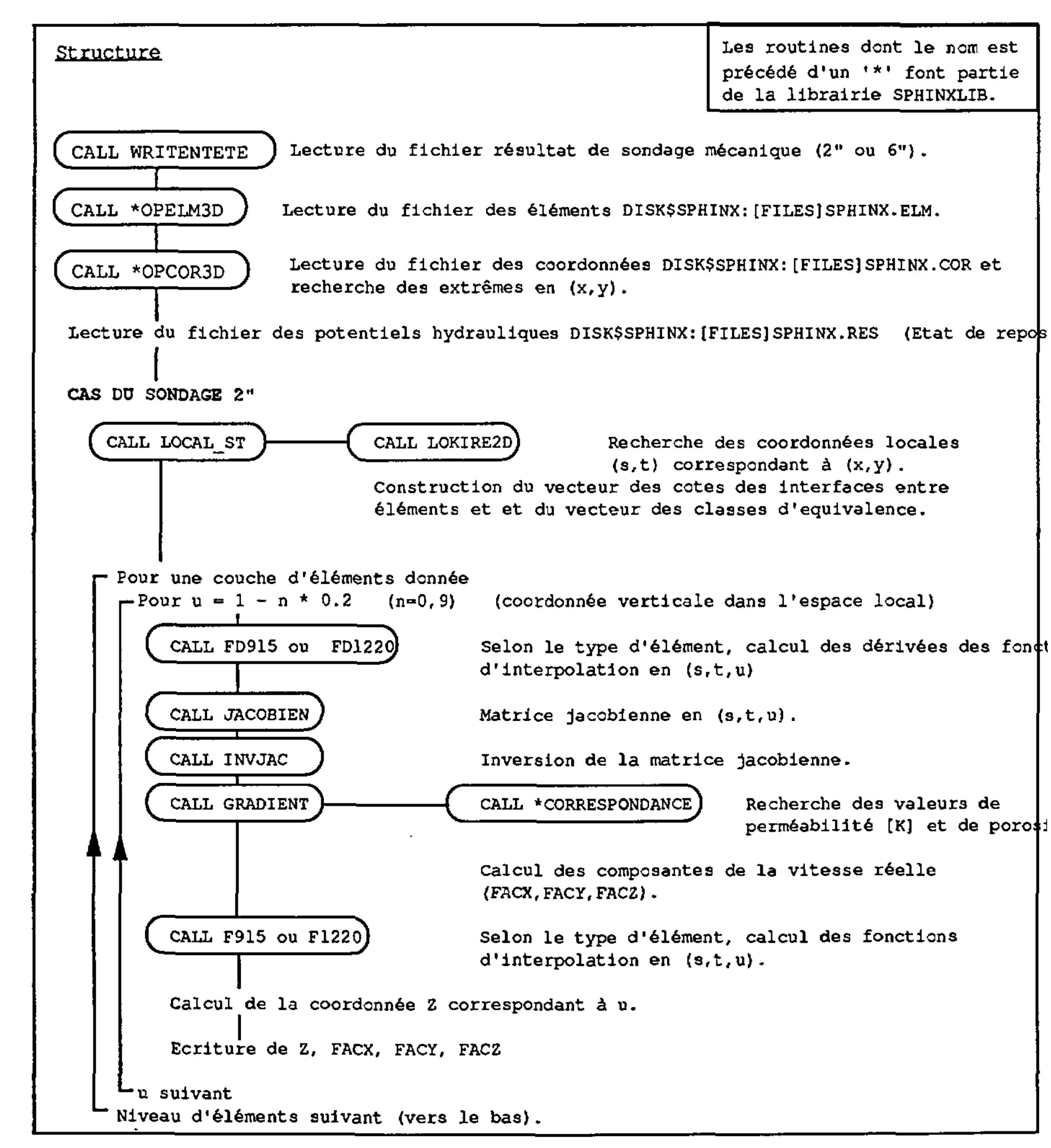
- RUN DISK$SPHINX:[EXECUTIONS]FLOWMETRE
  Calcul du rabattement à partir des états 1 et 3,
  Interpolation et sommation des flux selon la verticale.

4.5.12 Outil Vitesse réelle. Programme VITESSE

Vitesse réelle de l'eau à la verticale d'un forage 2" ou 6".
Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]6.COM.
Fonctionnement interactif.

Conditions générales

- L'aquifère est au repos; il n'y a pas de condition de débit imposée par l'utilisateur. Les fichiers d'éléments et de coordonnées non modifiés sont utilisés (SPHINX.ELM et SPHINX.COR).
- Les potentiels hydrauliques étant lus dans SPHINX.RES, la vitesse réelle est calculée comme si le forage n'existait pas (on suppose donc ici que la présence des forages ne modifie pas le système d'écoulement).



CAS DU SONDAGE 6"

Pour un niveau n d'éléments (Eléments numéros n*MAXELM2D; n=1, MAXCOUCHES)

Si ce n'est pas le premier niveau qui est traité, division de GRM (niveau précédent) par le nombre d'éléments riverains de la verticale et écriture de la moyenne.

Pour un élément

Si l'élément est riverain de l'aréte verticale où se trouve le forage,

Selon qu'il s'agit d'un prisme triangulaire ou rectangulaire et selon la position du nœud de la verticale dans le vecteur des nœuds constituant l'élément, on détermine s = ±1, t = ±1.

Pour u = 1 - n * 0.2 (n=0,9) (coordonnée verticale dans l'espace local)

Calcul de la vitesse, identique au cas du forage 2".

CALL GMN Sommation de FACX, FACY, FACZ dans GRM(10,3)

u suivant

Fin de si

Elément suivant

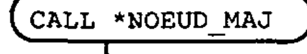
Niveau suivant

4.5.13 Ouvrage de captage. Programme CAPTAGE

Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]97.COM.
Fonctionnement interactif.

Structure générale

Les routines dont le nom est précédé d'un '*' font partie de la librairie SPHINXLIB.



Recherche du nœud coin le plus proche d'un (x,y) indiqué interactivement. En l'occurence (x,y) sont les coordonnées du point où l'utilisateur souhaite installer le captage définitif. Ce point ne correspond pas forcément à un forage 6" preexistant.

En cas d'acceptation, demande de la profondeur du captage, puis ecriture des lignes:

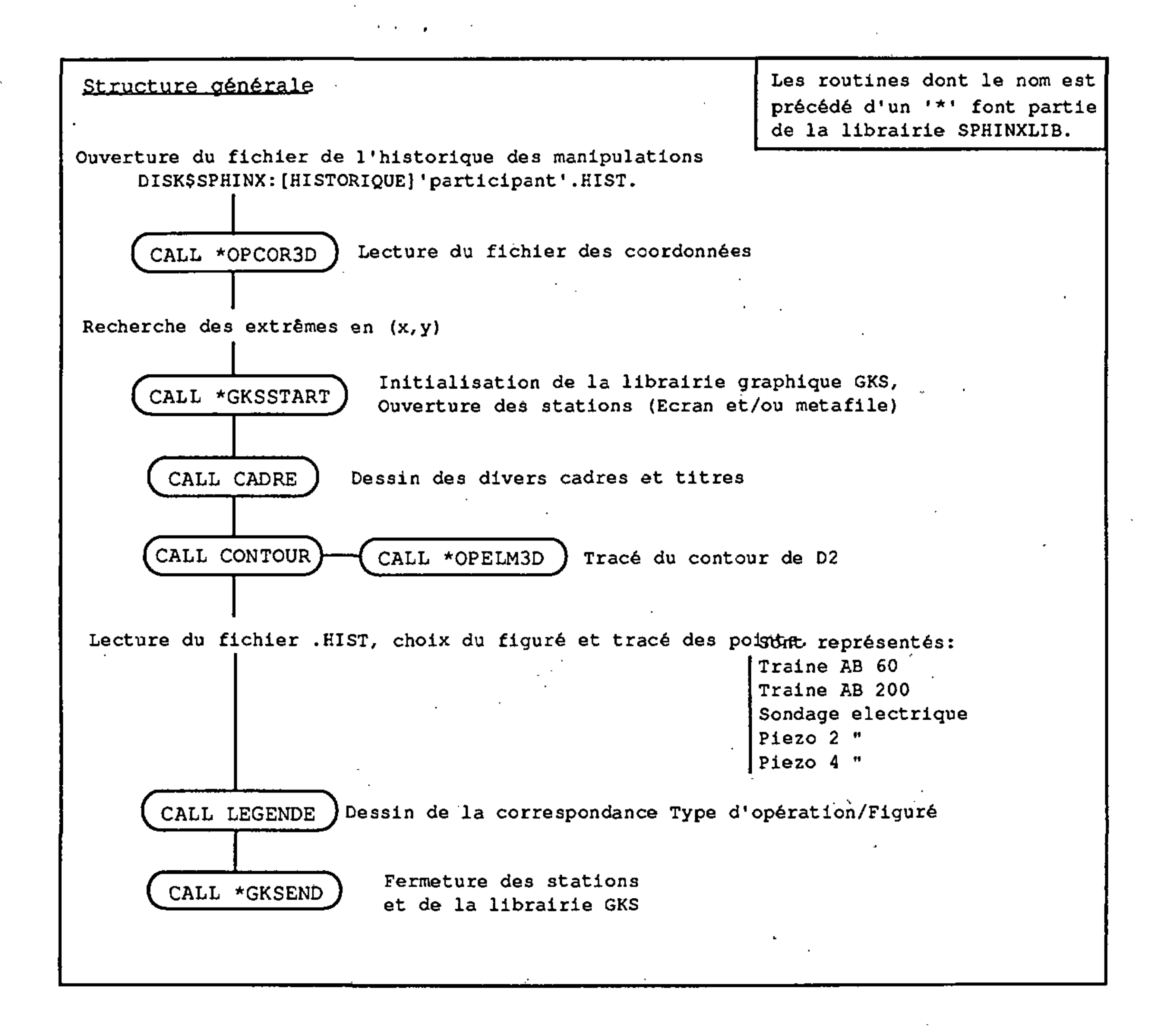
```
--------------------------------------------------------------------------
CAPTAGE DEFINITIF:  X=xxxxxxxx.x | Y=yyyyyyyy.y | Profondeur=ppppp [m]
Exercice termine au CHYN le 'DATE'
--------------------------------------------------------------------------
```

au bas du fichier DISK$SPHINX:[HISTORIQUE]'participant'.HIST.

Dés lors, la routine ACCES, placée en tête de tous les programmes 'payants' recherche le mot-clé CAPTAGE. En cas de succés, l'exécution est interrompue.

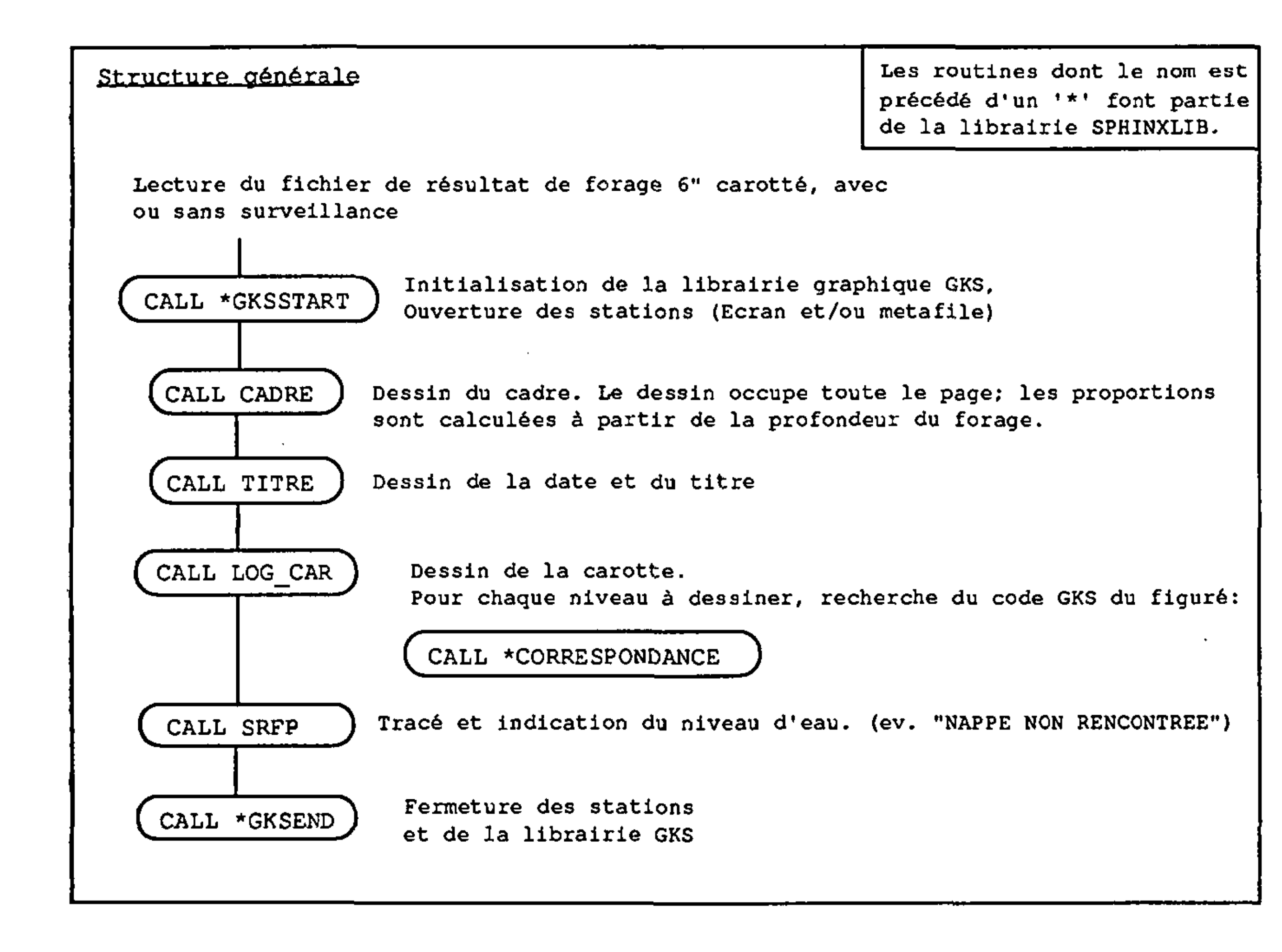
4.5.14.1 Carte des opérations effectuées. Programme DRAWOP

Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]93.COM.
Fonctionnement interactif.



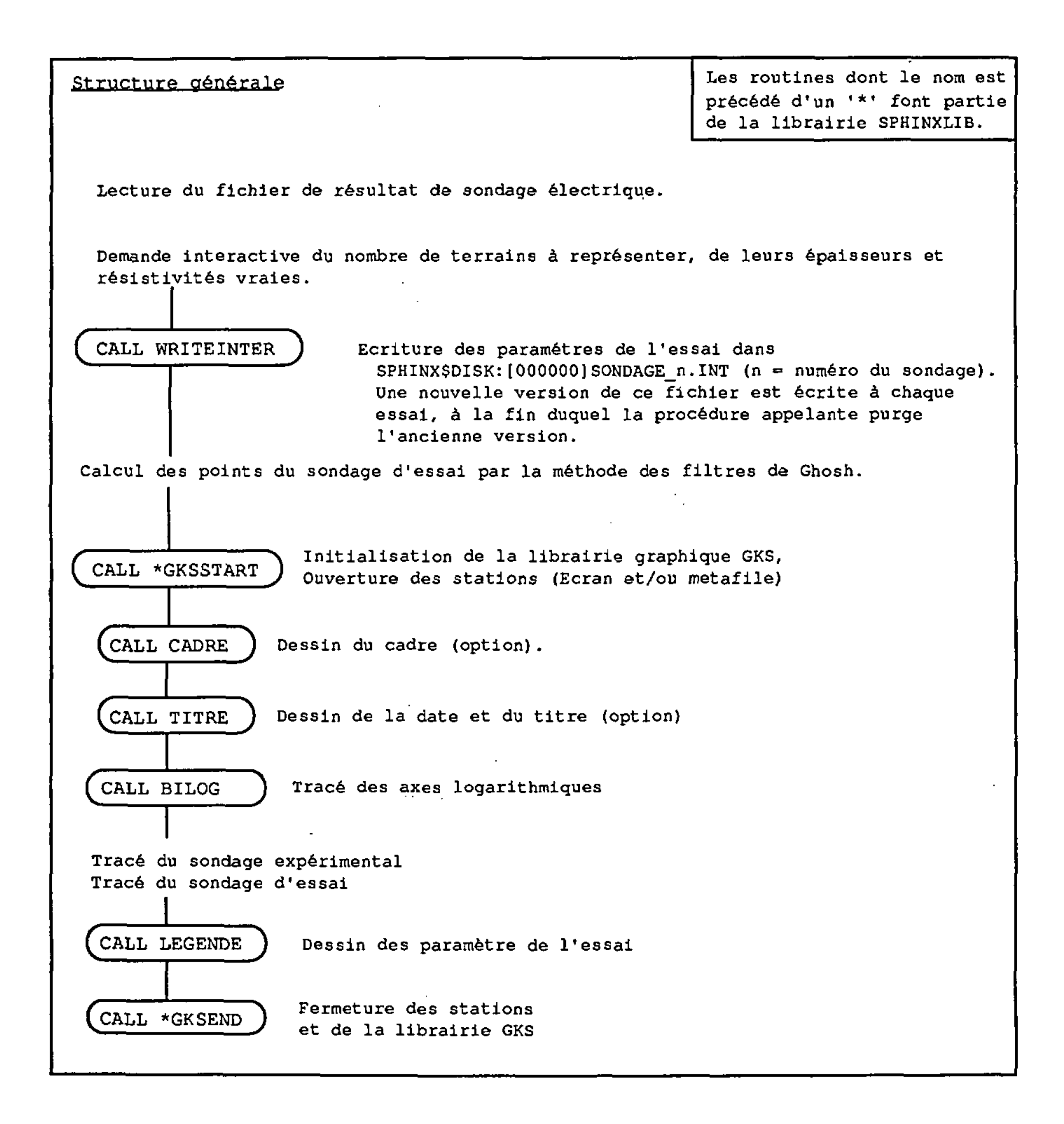
4.5.14.2 Tracé de log de forage. Programme DRAWLOG

Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]94.COM.
Fonctionnement interactif.



4.5.14.3 Interprétation graphique de sondage électrique. Programme INTERPRET

Appel par la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]95.COM.
Fonctionnement interactif.



4.5.15 Routines

Toutes les routines présentées ci-dessous font partie de la librairie DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.OLB. Ce sont des modules objet dont la présence est indispensable pour l'édition des liens des programmes SPHINX (cf § 5.4).

• **ACCES** est placée au début des programmes "payants" et vérifie:
- que le budget de l'utilisateur n'est pas ≤ 0. Le fichier budget doit donc être assigné au préalable par la procédure appelante. La routine ACCES ouvre le fichier budget mais ne le referme pas (sauf en cas de budget épuisé); cette tâche est accomplie lors de la facturation en fin de programme (cf FACTURATION).
- que le captage définitif n'est pas installé. Pour cela, il suffit de vérifier dans le fichier historique des manipulations (devant également être assigné au préalable) qu'aucune ligne ne comporte le mot-clé "CAPTAGE".

• **ALLOW_USE** est également appelée en début des programmes "payants" et sert à vérifier que le budget a été constitué (le devis validé). Pour cela, la routine vérifie que le mot-clé "VALIDE" figure sur la dernière ligne du fichier devis de l'utilisateur; ce fichier doit donc être assigné au préalable.

• **BIP** fait retentir la sonnerie (écriture du caractère ASCII 7).

• **CAROTTE & HCAROTTE** sont décrites au § 4.5.2.

• **CHECKINT & CHECKREAL** vérifient respectivement qu'une valeur introduite par l'utilisateur est un nombre entier ou réel. Les valeurs sont lues dans une chaine de caractères, puis écrites en entier réels dans un fichier interne. La clause d'erreur dans l'instruction WRITE permet de gérer une erreur éventuelle.

• **CORRESPONDANCE** contient la valeur des paramètres du domaine réaliste, les coordonnées de la zone urbaine et les paramètres budgétaires (cf **Annexe 6**).

• **EDITION** contient les formats FORTAN d'entrée/sortie à l'écran ou dans les fichiers. Le vecteur (FST) est dimensionné pour 200 formats de 400 caractères chacun au maximum. FST doit être passé à toute routine ayant une fonction I/O relisant un fichier existant ou ecrivant dans un fichier destiné à être relu par une autre fonction du logiciel. L'utilisation de cette routine permet d'alléger considérablement la rédaction des programmes appelant et annule les risques d'erreurs lors des I/O.

• **FACTURATION** est la dernière routine appelée par les programmes "payants". Ses fonctions sont:
- Ecrire au bas de l'historique des manipulations la nature, ev. la quantité et les coordonnées de l'opération qui vient d'être faite.

- Mettre à jour le budget, en modifiant la rubrique correspondant à l'opération et en recalculant le total et le solde. Le type de la manipulation est repéré par le paramètre NATURE; NOMBRE désigne la quantité par laquelle il faut multiplier le prix unitaire.

NOTE: Pour chaque nouvel utilisateur, le fichier budget est à l'état initial une copie de DISK$SPHINX:[BUDGET]NEW_USER.BUD; les prix unitaires utilisés sont donc ceux figurant dans ce dernier.

• **GKSSTART** initialise la librairie graphique PLOT10 GKS. Un fichier graphique est ouvert systématiquement, dans lequel seront écrites les primitives graphiques ultérieures. Selon la réponse à la question " Ce terminal est-il graphique ? ", les primitives sont également écrites à l'ecran (mode TEK4014). **GKSEND** déconnecte le fichier (et l'ecran) du mode graphique. Le passage de l'ecran du mode graphique au mode texte est fait par écriture de la séquence <ESC> définie dans les procédures DISK$SPHINX:[PROCEDURES]VTnnn.COM.

• **LOKIRE2D** calcule les coordonnées locales correspondant à un point donné de l'espace global [KIRALY, 1992]. Cette routine peut travailler en 3D mais n'est utilisée que'en 2D dans SPHINX; elle est appelée apr les routines CAROTTE et HCAROTTE.

• **NOEUD_MAJ** recherche les coordonnées globales du nœud coin le plus proche et n'étant pas l'objet d'une condition aux limites du modèle hydrodynamique d'un (x,y) de surface indiqué par l'utilisateur. Cette routine est utilisée pour l'installation des forages 6" et du captage définitif.

• **OLDFILE** vérifie qu'un fichier de forage mécanique, dont le nom est basé sur un numéro donné par l'utilisateur, n'existe pas déjà. En cas d'échec, le programme appelant demande un nouveau numéro. La procédure appelante doit avoir construit la liste des fichiers résultats de forage mécanique du directory SPHINX$DISK:[000000] (directory SPHINX du participant).

• **OPELM3D & OPCOR3D** lisent les fichiers d'éléments et de coordonnées respectivement (cf **Annexe 6**) et chargent les différents vecteurs en mémoire centrale.

• **PATIENCE** envoie à l'écran un message d'attente; elle est appelée lorsqu'un traitement interactif peut être long.

• **ZONE_URBAINE** vérifie qu'un point de coordonnées globales (x,y) de D2 n'est pas dans la zone urbaine, qui est un polygone dont les coordonnées sont définies dans CORRESPONDANCE.
Principe: Si le segment de droite [(0,y) , (x,y)] coupe un nombre impair de segments définissant le polygone, alors (x,y) est dans le polygone.

Note: Il ne peut y avoir qu'une zone urbaine. Sa présence n'est pas indispensable au fonctionnement du logiciel; elle est toutefois nécessaire dans la configuration actuelle.

4.6 Contrôle sur le déroulement de la prospection.

Les versions source des programmes appelés par "l'œil du maître" sont contenus dans DISK$SPHINX:[IA] et les versions executables sont (comme les outils) dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]. Ce ne sont que les traductions FORTRAN des règles exposées sous 3.6.2. Les coefficients nécessaires au fonctionnement, spécifiques au domaine réaliste en vigueur, sont contenus dans DISK$SPHINX:[IA]DOMAIN$PARAMETERS.FOR (cf Annexe 7).

Chapitre V

Modalités de transformation du système

Ce chapitre est destiné à toute personne jouant le rôle de l'opérateur et souhaitant modifier une partie du logiciel. Il s'agit principalement des modalités de remplacement du domaine réaliste, c'est à dire de décrire la manière dont celui-ci est stocké. On trouvera également ci-dessous les règles à respecter pour ajouter ou modifier un outil.

5.1 Stockage de D3

Le changement de domaine réaliste consiste à remplacer/modifier les fichiers suivants:

DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.ELM
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.COR
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.RES
DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT
DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR

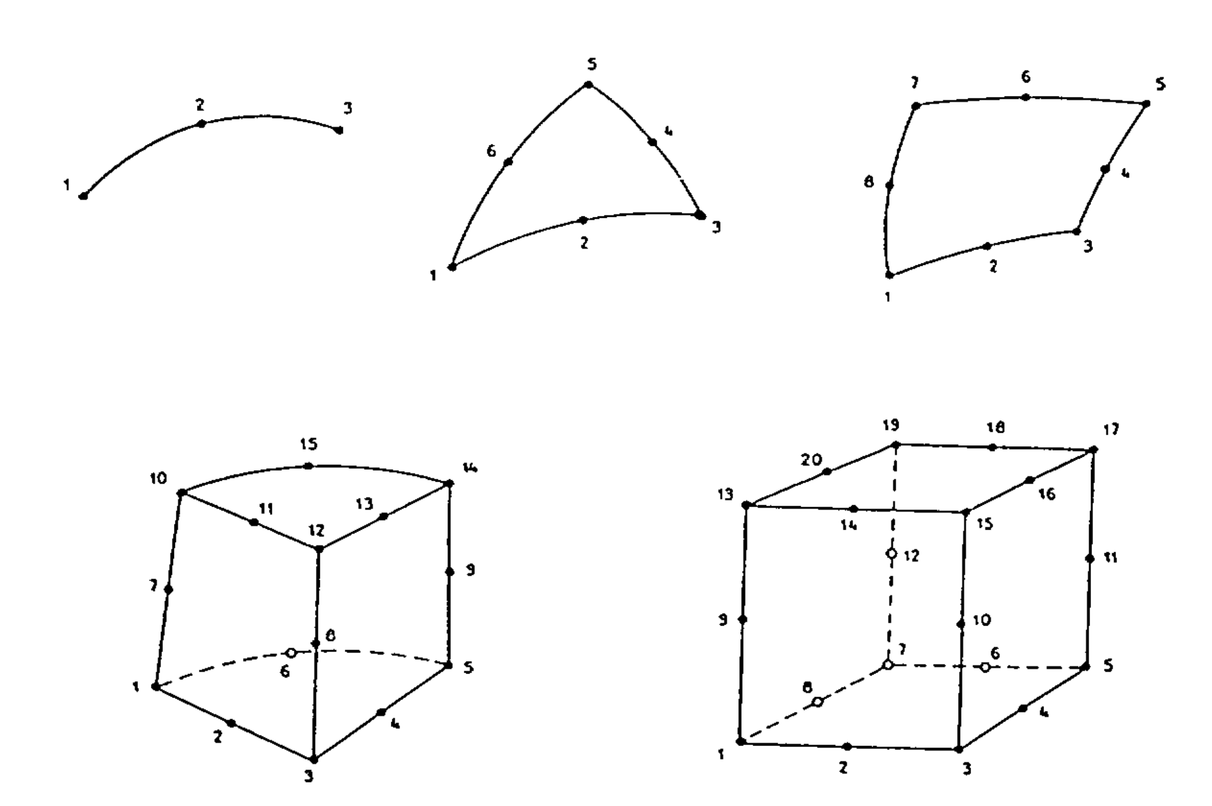
5.1.1 Géométrie

La géométrie du domaine (i.e la forme des champs de paramètres) est décrite par:
- DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.ELM, qui contient la topologie des éléments finis constituant le réseau (liste des éléments et des nœuds les constituant). Le numéro de la classe pour les 2 relations d'équivalence figure également pour chaque élément. La liste des éléments figure immédiatement sous le mot clé *ELEMENTS* (cf **Annexe 6**).
Au dessus, l'écriture de commentaires est autorisée.
Chaque élément est décrit comme suit (le fichier est en format libre):

ILM NQ NP KR NAR NIC(1) .... NIC(KR)

où:
- ILM numéro de l'élément
- NQ numéro de la classe d'equivalence (Débit distribué)
- NP numéro de la classe d'equivalence (tous les autres paramètres)
- KR nombre de nœuds définissant l'élément
- NAR nombre d'arètes de l'élément.
- NIC numéros des nœuds constituant l'élément (de 1 à KR), en commençant par un nœud coin, depuis la face inférieure pour les

élément 3D, en tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.



ORDRE d'apparition des nœuds dans la définition d'un élément, pour tous les types d'éléments autorisés.

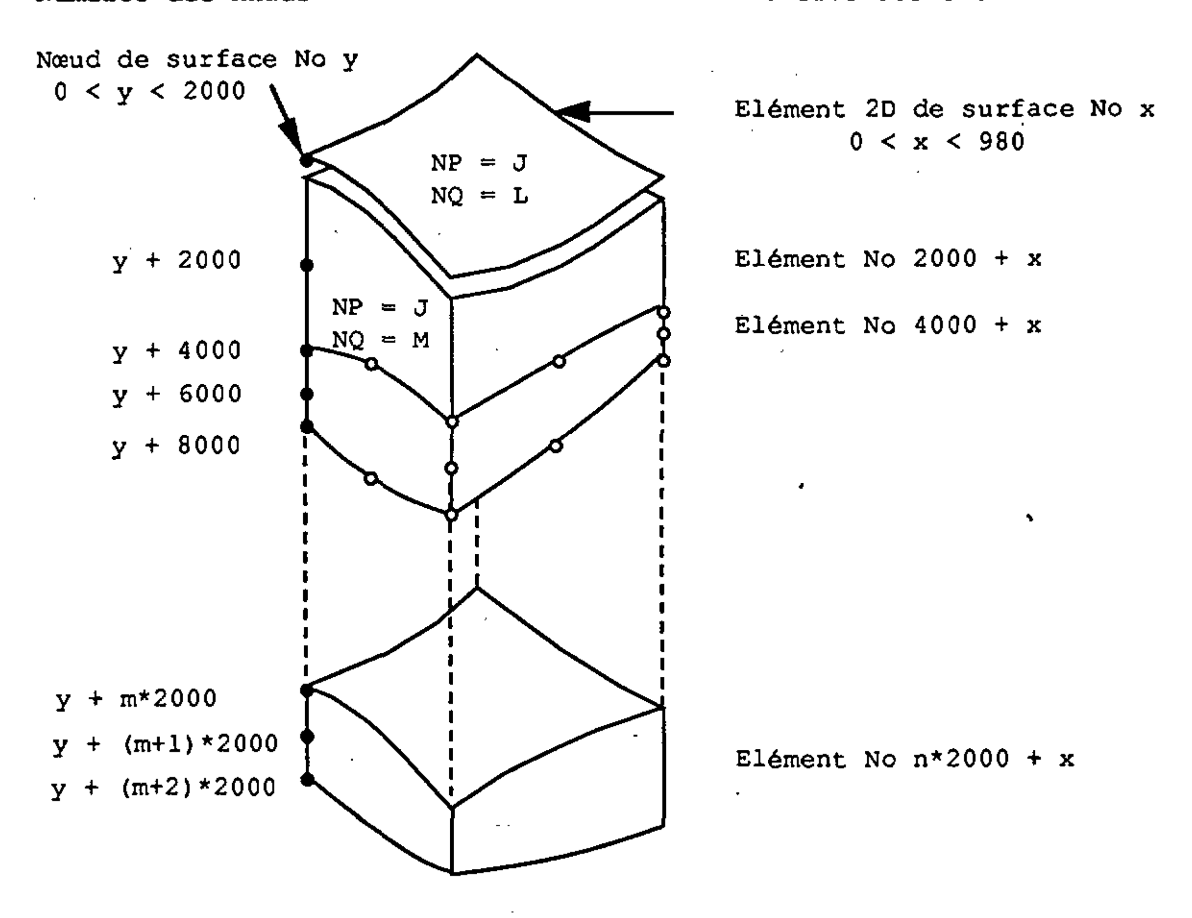
Les éléments sont tous quadratiques; il y a 3 nœuds sur chaque arète. Les éléments pincés ne sont pas admis; les variations latérales de faciès sont donc représentées en mettant cote à cote des éléments de faible épaisseur.

Un niveau d'éléments 2D doit couvrir la face supérieure du domaine.
La classe d'equivalence (perméabilité, porosité, Nature pétrographique & faciès, etc.) doit être identique pour un élément 2D de surface et l'élément 3D placé immédiatement dessous.

Les éléments 2D de surface sont numérotés de 1 à 979 au maximum; il peut y avoir des "trous" dans la numérotation.

A l'intérieur de D3, tout élément porte le numéro de celui qui est immédiatement au dessus + 2000 (= MAXELM2D).

Le nombre maximum d'éléments dans une colonne est MAXCOUCHES, sans compter le niveau d'éléments 2D de surface. Dans la configuration actuelle, MAXCOUCHES vaut 4; il y a donc au maximum 4 niveaux d'éléments + le niveau d'éléments 2D de surface. Les éléments 2D "en plan", autres que ceux de la couche de surface, comptent pour une couche.



n = nombre de couches existant effectivement dans D3 pour une colonne d'éléments donnée. n ≤ MAXCOUCHES

Les arètes latérales sont verticales. Sur une verticale, les numéros de nœuds valent le numéro du nœud de surface + m * MAXELM2D, où m est le nombre de nœuds depuis la surface. MAXELM2D = 2000.

- DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.COR contient les coordonnées des nœuds.
Le fichier est en format libre. Sous le mot-clé *COORDINATES*, figurent les facteurs multiplicatifs selon x,y et z. Ce facteur doit être identique selon x et y. Au dessous, sur chaque ligne, figurent le numéro du nœud et ses coordonnées selon (x,y,z) diviséea par les facteurs multiplicatifs correspondant. Aucun nœud ne doit figurer plus d'une fois et le fichier doit être classé par ordre croissant des numéros de nœuds (cf **Annexe 6**).

Remarque: Modification de MAXCOUCHES.

- MAXCOUCHES est déterminant sur le besoin du logiciel en mémoire paginée. En augmentant MAXCOUCHES, il faut recalculer la mémoire nécessaire (cf § 4.1.3) et modifier la valeur de MINIQUOTA dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]TEST_MEMORY.FOR.

- MAXCOUCHES est défini une fois pour toutes dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT et affecte automatiquement la dimension des vecteurs dans tout le logiciel. Cela signifie qu'une modification de MAXCOUCHES nécessite la recompilation de tout le logiciel (cf § 5.4).

5.1.2 Valeur des paramètres

Les valeurs des paramètres associées à chaque classe d'équivalence figurent dans deux fichiers distincts:
- DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR (fichier texte)
- DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR (routine Fortran)

Les raisons de ce "double emploi" sont:
- conserver la syntaxe des entrées/sorties des modèles hydrodynamiques FEN1 et FEN2. Ces derniers peuvent donc rapidement être remplacés par des modèles adoptant les mêmes normes de lecture/écriture.
- lors des essais de pompage ou de flowmètre, MODI_RESEAU crée 2 nouvelles classes d'equivalence, MAXCOUCHES+1 ET MAXCOUCHES+2, destinées aux valeurs de K et m dans les éléments 1D verticaux; ces classes n'apparaissent que dans SPHINX.PAR (utilisé uniquement en rapport avec FEN1 et FEN2). Le fait de les introduire dans CORRESPONDANCE.FOR reviendrait à augmenter MAXCOUCHES de 2 et donc à accroître sensiblement les besoins du logiciel en mémoire paginée.

- Les paramètres communs aux 2 fichiers sont K et m (ils doivent donc être égaux dans les 2 cas, mais SPHINX.PAR comporte 2 classes de plus).
- AD ne figure que dans SPHINX.PAR.
- Les autres paramètres ne figurent que dans CORRESPONDANCE.FOR.
  (cf **Annexe 6**)

5.1.3 Données climatiques

DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT contient les données climatiques. Il peut être modifié sans autre, la seule contrainte étant d'y introduire des valeurs en rapport avec D3 (contexte naturel, conditions aux limites). Sous le mot clé *CLIMATIC DATAS*, chaque ligne comporte le jour de l'année civile, la température moyenne journalière [°C] et les précipitations [mm/jour]. Si le nombre de points dépasse 500, il faut redimensionner MXP dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DRAWCLIMAT.FOR

5.1.4 Contraintes budgétaires

Le changement de D3 et/ou de but peut justifier la modification du devis optimum prévu par le logiciel:
- changement du montant total du devis,
- changement du pourcentage prévu pour chaque type d'opération.

Respectivement, il suffit de modifier dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR les valeurs de SPHINXTOT et du vecteur SPHINXETAT.

5.2 Modification/Ajout d'outils

La structure d'un programme SPHINX (cf § 4.1.5) sera respectée; les variables utilisées seront celles contenues dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT. Les formats de lecture ou d'écriture seront chargés dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]EDITION.FOR, quitte à introduire de nouveaux formats dans cette routine.

S'il s'agit d'un outil nouveau et qu'il fait l'objet d'un traitement par lots, la procédure d'appel sera connectée au point 5 du menu principal. La raison est que le programme SHOWQUEUE2, qui force la sortie du logiciel et en interdit l'accès tant que le job n'est pas terminé, est appelé à chaque sortie de 5.COM.

S'il s'agit d'un outil nouveau, qu'il est facturable et qu'il remplace un autre outil, il faut modifier le nom de la manipulation et éventuellement le pourcentage prévu et le montant total du devis dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR; le nom de la manipulation et le prix unitaire seront modifiés dans DISK$SPHINX:[BUDGET]NEW_USER.BUD.

S'il s'agit d'un outil nouveau, qu'il et facturable et qu'il s'inscrit en plus des outils existant, on procèdera comme ci-dessus mais en ajoutant

dans les fichiers et routines le nom, le % du devis (le total doit être maintenu à 100) et le prix unitaire. Le nombre maximum d'outils est régi par le paramètre NBITEM, qu'il convient alors d'augmenter. Lors de la mise à jour de l'historique des manipulations (CALL FACTURATION) la valeur de NATURE doit être différente de toutes celles existant déjà et dont on rappelle la liste. Si on souhaite que le nouvel outil apparaisse sur la représentation graphique de l'historique des manipulations, on modifiera en conséquence le programme DRAWOP.FOR

Remarque: les articles facturables ne sont pas lies, du point de vue du programme, aux articles faisant l'objet d'un devis

Si les modèles hydrodydnamiques FEN1 et FEN2 sont remplacés par des modèles de nature différente (e.g type nappe libre), la définition du niveau d'eau change. Par conséquent, tous les programmes faisant intervenir le niveau d'eau (forages, pompages, flowmètre, vitesse réelle) doivent être adaptés (en l'occurence simplifiés) à la nouvelle définition. Une telle modification est souhaitable.

5.3 L'œil du maitre

Les coefficients spécifiques au domaine et au but à atteindre sont contenus dans la routine DISK$SPHINX:[IA]DOMAIN$PARAMETERS.FOR. (cf **Annexe 7**). Les explications des divers paramètres y figurent sous forme de commentaires. Toute modification implique la recompilation des programmes contenus dans DISK$SPHINX:[IA].

5.4 Directives de compilation

Les versions objet des routines Fortran de DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE] doivent être placées dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB.OLB.

- Modification d'une routine existante:
```
$ FORTRAN routine
$ LIBRARY/REPLACE SPHINXLIB routine
```
- Ajout d'une nouvelle routine:
```
$ FORTRAN routine
$ LIBRARY/INSERT SPHINXLIB routine
```

Les versions éxecutables des programmes Fortan de DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES] doivent être placés dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]. L'edition des liens, au moins pour les programmes graphiques, fera appel à la librairie GKS. Sur NEDCU0::

```
$ FORTRAN programme
$ LINK/EXE=DISK$SPHINX:[PRAGRAMMES.EXECUTIONS] programme , -
  DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]SPHINXLIB/LIB, -
  SYS$GKS:SGKS/LIB
```

Les programmes du directory DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES.MODELES], FEN1.FOR et FEN2.FOR n'appelent aucune routine de SPHINXLIB.OLB. Ils sont compilés et linkés sans aucune librairie; les versions éxecutables correspondantes doivent également étre dans DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.EXECUTIONS]

Chapitre VI

Guide de l'utilisateur

La commande provoquant le fonctionnement du logiciel est, sur NEDCU0::

@DISK$GEOL:[TACHER.SPHINX.PROCEDURES]SPHINX

Ce chapitre est une reproduction des informations contenues dans le logiciel. Elles apparaissent à la demande de l'utilisateur, avant toute manipulation; seules les informations en rapport avec l'opération en cours sont affichées. Le préfixe du nom du fichier texte contenant les informations vaut le numéro de la procédure appelante; son suffixe est INFO.
Exemple: Le fichier DISK$SPHINX:[INFOS]51.INFO est affiché (sur demande) lorsque la procédure DISK$SPHINX:[PROCEDURES]51.COM est activée.

DISK$SPHINX:[INFOS]0.INFO

SPHINX: Informations generales.

1) Principe:

SPHINX est un ensemble de procedures et de programmes destines a l'enseignement, orientes vers la prospection hydrogeologique.

La prospection hydrogeologique simulee se pratique sur un domaine fictif qui constitue une simplification du milieu naturel represente. Par ailleurs, le comportement de ce domaine face aux diverses operations qu'il est possible d'effectuer correspond a la construction de modeles (hydrauliques, electrique...). Dans la mesure du possible, les modeles reproduisent le comportement d'un systeme reel, mais ne sont pas le systeme reel:
- Le domaine est une approximation de l'aquifere represente (formes simples),
- Les modeles produits admettent des hypotheses simplificatrices qui eloignent encore le comportement de l'aquifere simule de celui de l'aquifere reel.

De ce fait, du point de vue de l'utilisateur, les "regles du jeu" ne sont pas tout a fait celles de la prospection relle. Par exemple, un sondage electrique dans SPHINX reproduira la reponse de l'aquifere en supposant que les couches ont une extension laterale infinie.

Les hypotheses de travail sont expliquees en detail au fil des operations; Il faut en tenir compte !

2) Fonctionnement:

Il suffit que chaque participant dispose d'un directory principal, dans lequel SPHINX creera automatiquement un sous-directory.
(Ex: [participant.SPHINX])
Les fichiers crees lors de certaines operations y seront places. Ces fichiers sont parfois utilises apres leur creation par d'autres fonctions de SPHINX:

VOUS NE DEVEZ DONC EN AUCUN CAS TENTER DE LES MODIFIER.
****

Pour les examiner, des utilitaires appropries sont contenus dans SPHINX. De meme pour les imprimer; l'imprimante assignee a SPHINX est GEOL_1.

La structure modulaire de SPHINX le rend facile a utiliser. Les menus sont organises de maniere hierarchique. Les erreurs de manipulation ne portent pas a consequence.

3) Realisation:

Implantation: VAX
Procedures: VMS V5.4
Programmes: VAX FORTRAN77
Librairie graphique: GKS V3.2

DISK$SPHINX:[INFOS]11.INFO

INFORMATIONS: Mandat

```
-----------------------------------------------------------------------------
| Le but est de trouver dans le domaine realiste un point (x,y) ou imposer   |
| un debit de 10'000 [m3/jour], sans provoquer un rabattement superieur a    |
| 1.0 [m], ni en ce point ni en d'autres. La distance de ce point au lieu    |
| d'exploitation (X = 903'000, Y = 220'500) doit etre inferieure a 1'500 [m].|
| Le champ des vitesses reelles doit permettre de prevoir qu'une pollution   |
| provenant de la zone urbaine ne gagnera pas (x,y) en moins de 10 jours.    |
-----------------------------------------------------------------------------
```

Pour cela, les elements suivants sont a disposition:
- Carte topographique (rubrique 9.1),
- Carte geologique (9.2),
- Bibliographie (1.3).

Le premier stade consiste a faire une offre pour la prospection (1.2). Une fois validee, cette offre deviendra votre budget, auquel sera soustrait au fur et a mesure le prix des differentes operations effectuees. Tous les outils de prospection dont l'utilisation est facturable (geophysique, forages, essais de pompage,etc.) sont inaccessibles tant que le budget n'est pas constitue. On peut consulter a tout moment le budget actualise (8.1).

ATTENTION: Lorsque le budget est epuise, l'acces aux outils est interdit. Il faut donc s'arranger pour atteindre le but avant de n'avoir plus d'argent (l'unite monetaire est le US $).

La fin normale de l'exercice consiste en l'installation du captage definitif (7). Une fois ceci fait, les outils de prospection deviennent egalement inaccessibles.

Un fichier "espion" enregistre toutes les operations effectuees par chaque utilisateur. Cet historique des manipulations peut etre consulte directement (8.3) ou graphiquement (9.3); il a pour vocation d'aider l'utilisateur par une representation claire de ce qu'il a fait, mais aussi de favoriser la discussion avec une tierce personne.

DISK$SPHINX:[INFOS]12.INFO

INFORMATIONS: Devis

Les notions suivantes sont a distinguer:

DEVIS ou OFFRE: C'est le montant que vous estimez necessaire pour parvenir au but.

BUDGET : Une fois l'offre validee, elle devient votre budget, c'est-a-dire le montant dont vous disposerez effectivement.

Ce point du programme consiste a faire l'offre en vue de parvenir au but (1.1). Une fois cette offre validee il n'est plus possible de la modifier. Le fonctionnement est le suivant:

- Les types d'operations pour lesquels il faut prevoir une depense sont imposes. Pour chacun d'eux, il faut donc introduire un montant. Les rubriques peuvent etre completees dans un ordre quelconque et pas forcement lors d'une meme session. Par exemple, on peut introduire uniquement la prevision concernant les sondages 2" et quitter le logiciel.
  Lors d'une session ulterieure, on retrouve le devis a l'etat dans lequel on l'a laisse auparavant.

- Lorsque toutes les rubriques sont completees par des montants qui semblent convenables a SPHINX, celui-ci propose de valider le devis, c'est a dire d'en faire votre budget definitif. Lorsque l'utilisateur et le logiciel sont d'accord pour valider l'offre:
  * Le budget est enregistre; son montant total vaut celui de l'offre. Le prix de toutes les operations facturables effectuees par la suite lui sera automatiquement soustrait.
  * L'offre n'est plus modifiable (le programme de devis n'est plus accessible).

DISK$SPHINX:[INFOS]13.INFO

SPHINX: BIBLIOGRAPHIE

NOTE: Cette bibliographie est representative du niveau de complexite du domaine d'investigation et des modeles a disposition. Elle est donc sommaire et ne fait etat que des aspects et parametres figurant effectivement dans SPHINX.

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Les coordonnees geographiques moyennes de la region sont 46o48' de latitude nord et 6o21' de longitude est. Il s'agit d'un cone fluvio-glaciaire a tres faible pente, d'altitude moyenne = 810 m. Ce cone constitue le remplissage d'un vaste synclinal dont les flancs atteignent des altitudes de l'ordre de 1000 m.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

La province geologique est le Jura plisse. L'axe du synclinal (Jurassique) est oriente NNE - SSW; il est encadre par deux anticlinaux orientes de la meme maniere. Les petits cours d'eau circulant sur le cone fluvio-glaciaire s'ecoulent vers le nord.

STRATIGRAPHIE

Le Jurassique est represente par des calcaires marneux d'une puissance moyenne de 200 m. Des plaquages morainiques attribues au Wurm le recouvrent localement;
il s'agit de moraines frontales, interpretees comme des traces de l'extremite occidentale d'une calotte glaciaire.
Pour le quaternaire recent, les affleurement de surface ne montrent que des graviers, qui pourraient donc constituer la totalite du cone fluvio-glaciaire.
La cluse visible sur la carte topographique est la trace du cours d'eau ayant charie ces graviers.

DISK$SPHINX:[INFOS]21.INFO

INFORMATIONS: ETP (Thornthwaite)

Les modeles d'evapotranspiration potentielle ne sont pas facturables. On peut donc les utiliser aussi souvent que l'on veut. Leur utilisation n'est pas inscrite dans l'historique des manipulations.

Le calcul d'ETP (2.1 et 2.2), couple aux donnees climatiques (2.3) est destine a estimer la recharge de l'aquifere par les precipitations. C'est donc un element important, que vous pouvez aussi utliser pour construire un modele de simulation.

DISK$SPHINX:[INFOS]22.INFO

INFORMATIONS: ETP (Turc)

Les modeles d'evapotranspiration potentielle ne sont pas facturables. On peut donc les utiliser aussi souvent que l'on veut. Leur utilisation n'est pas inscrite dans l'historique des manipulations.

Le calcul d'ETP (2.1 et 2.2), couple aux donnees climatiques (2.3) est destine a estimer la recharge de l'aquifere par les precipitations. C'est donc un element important, que vous pouvez aussi utliser pour construire un modele de simulation.

DISK$SPHINX:[INFOS]23.INFO

INFORMATIONS: Donnees climatiques

La consultation, sous forme graphique, des donnees climatiques n'est pas facturable. On peut donc les voir aussi souvent que l'on veut. L'utilisation n'est pas inscrite dans l'historique des manipulations.

Il s'agit des courbes de precipitation et de temperature concernant le domaine d'investigation.

****
Dans SPHINX, l'aquifere n'evolue pas spontanement avec le temps; cela signifie que l'exercice ne se deroule pas a une date precise (le logiciel "donne des resultats" identiques, qu'il fonctionne en aout ou en fevrier !). Par contre, l'aquifere est representatif des conditions climatiques moyennes sur l'annee.
****

Les donnees climatiques seront de preference demandees a partir d'un terminal graphique. Si ce n'est pas le cas, le graphique ne sera pas affiche a l'ecran mais peut etre envoye sur l'imprimante.

DISK$SPHINX:[INFOS]31.INFO

INFORMATIONS: Sondage electrique

Dans SPHINX, les sondages electriques sont simules en utilisant la methode des filtres de Ghosh; les hypotheses simplificatrices sont les suivantes:

- Extension laterale infinie. Le modele de sondage est produit comme si les couches conductrices ne variaient pas lateralement, ni en epaisseur ni en resistivite electrique vraie. Autrement dit, il n'y a pas d'effets lateraux.
- Le potentiel hydraulique n'influe pas les resistivites vraies. Cela signifie qu'un sondage electrique SPHINX ne rend pas compte de l'etat de saturation de la roche et qu'il ne peut pas etre utilise pour determiner le niveau de la nappe. Par contre, il renseigne indirectement sur la nature geologique des terrains et donc sur les parametres hydrogeologiques.

Plusieurs longueurs de ligne sont a disposition, que l'on choisira en fonction de la profondeur d'investigation souhaitee. La facturation est independante de la longueur de ligne; l'historique des manipulations la comporte. Le tarif est visible dans le budget (8.1).

Le resultat d'un sondage electrique est stocke dans un fichier SONDAGE_xx.RES ou xx est un numero qui vous est demande par le programme; le numero xx sera refuse par le programme s'il est < 0 , > 9999 ou s'il a deja ete attribue. Ce fichier (ou tout autre fichier de sondage electrique) peut etre consulte a la fin de la manipulation ou par l'utilitaire 9.6. Il peut aussi faire l'objet d'une interpretation graphique, permettant de definir les resistivites electriques vraies des terrains rencontres.

N'EDITEZ EN AUCUN CAS UN FICHIER SONDAGE_xx.RES, CAR TOUTE MODIFICATION DE SON CONTENU LE RENDRAIT IMPROPRE A L'UTILISATION PAR LE PROGRAMME D'INTERPRETATION (9.5).

Un sondage electrique SPHINX se presente comme suit:

```
Rappel du numero du sondage,
Rappel des coordonnees (x,y) du lieu du sondage. (x,y) aura ete refuse
par le programme s'il est en zone urbaine ou s'il est en dehors du domaine.

OA = ...          Rhoapp = ...
OA = ...          Rhoapp = ...
OA = ...          Rhoapp = ...
    ...

ou OA [m] est la demi longueur du dispositif,
   Rhoapp [ohm.m] est la resistivite apparente.
```

DISK$SPHINX:[INFOS]32.INFO

INFORMATIONS: Traine electrique

Comme pour les sondages, les traines electriques sont simules en utilisant la methode des filtres de Ghosh; Un traine est en fait une serie de sondages realises sur une droite que l'utilisateur definit par ses extremites; il indique en outre l'espacement entre 2 stations successives sur cette droite. Les hypotheses simplificatrices sont les suivantes:

- Extension laterale infinie. A chaque station le modele est produit comme si les couches conductrices ne variaient pas lateralement, ni en epaisseur ni resistivite electrique vraie. Autrement dit, il n'y a pas d'effets lateraux
- Le potentiel hydraulique n'influe pas les resistivites vraies. Cela signifi qu'un traine electrique SPHINX ne rend pas compte de l'etat de saturation de la roche et qu'il ne peut pas etre utilise pour determiner le niveau de la nappe. Par contre, il renseigne indirectement sur la nature geologiqu des terrains et donc sur les parametres hydrogeologiques.

Plusieurs longueurs de ligne sont a disposition, que l'on choisira en fonction de la profondeur d'investigation souhaitee. La facturation est independante de la longueur de ligne et vaut un prix unitaire (visible dans le budget (8.1)) que multiplie le nombre de stations. L'historique des manipulations comporte la longueur de ligne et le detail des stations.

Le resultat d'un sondage electrique est stocke dans un fichier TRAINE_ABnnn_xx.RES, ou xx est un numero qui vous est demande par le programme le numero xx sera refuse par le programme s'il est < 0 , > 9999 ou s'il a deja ete attribue. nnn est la longueur de ligne et vaut 060 ou 200.
Exemple: TRAINE_AB060_3.RES

Ce fichier (ou tout autre fichier de traine electrique) peut etre consulte a la fin de la manipulation ou par l'utilitaire 9.8.

Le programme refusera l'operation si un seul des points est en zone urbaine. S certaines stations se trouvent en dehors du domaine, il n'y a pas interruption les resultats et la facturation concerneront seulement les points situes dans le domaine.

Un sondage electrique SPHINX se presente comme suit:

```
    Rappel du numero du traine,
    Rappel des coordonnees des extremites de la droite sur laquelle est realis
    le traine, de l'espacement entre stations, du nombre de stations
    necessaires et de la longueur du dispositif (60 ou 200 [m]).

    Coordonnees   x= ....    y= ....       Rhoapp= ....
    Coordonnees   x= ....    y= ....       Rhoapp= ....
    Coordonnees   x= ....    y= ....       Rhoapp= ....
     .....
       Rhoapp [ohm.m] est la resistivite apparente a la station (x,y).
```

DISK$SPHINX:[INFOS]4.INFO

INFORMATIONS: Piezometres. Generalites

Dans SPHINX, les definitions suivantes sont toujours vraies:

POTENTIEL HYDRAULIQUE: Dans SPHINX, le potentiel hydraulique est exprime en [m]

$$\text{et vaut :} \quad h = z + \frac{p}{r.g}$$

ou : z = cote [m]
p = pression [kg/m.s2]
r = densite de l'eau [kg/m3]
g = acceleration de la pesanteur [m/s2]

Il existe partout dans le domaine d'investigation, un potentiel hydraulique. Lors d'un forage, l'aquifere est au repos; le potentiel hydraulique verifie en tout point l'equation:

$$\mathrm{div}(-[K] \, . \, \overrightarrow{\mathrm{Grad}} \, . \, h) + Q = 0$$

ou : [K] = permeabilite [m/s]
h = potentiel hydraulique [m]
Q = debit injecte ou preleve [m3/s.m3]

Les hypotheses suivantes sont inherentes a cette equation:
- Le milieu est partout sature (modele type nappe captive),
- La permeabilite ne depend pas du potentiel hydraulique.

Les divers types de forages (piezometres) sont crepines sur toute leur hauteur. Les niveaux d'eau dans ces forages ne sont donc pas des valeurs ponctuelles du potentiel hydraulique (cas des forages ouverts uniquement a leur base):

NIVEAU D'EAU: Dans SPHINX, le niveau d'eau [m] dans un piezometre crepine sur toute sa longeur est la moyenne des potentiels hydrauliques rencontres entre la surface du domaine et la base de l'ouvrage, ponderee par l'epaisseur des niveaux traverses et par leur permeabilite (max(Kxx,Kyy,Kzz)).

Les piezometres sont toujours verticaux.

DISK$SPHINX:[INFOS]41.INFO

INFORMATIONS: Sondage 2 "

Les sondages de diametre 2" presentent la particularite de pouvoir etre installes a partir de n'importe quel point de surface. La profondeur maximum de ces piezometres est controlee par la resistance a l'avancement (frottement). Selon les terrains, il peut donc arriver que le sondage "butte" et ne puisse plus progresser. Cela constitue la seule source d'information concernant la nature geologique du sous-sol (pas de carotte). Le niveau d'eau est communique.

ATTENTION: Les piezometres 2" sont des piezometres d'observation. Il n'est pas possible d'y effectuer par la suite des essais de pompage ou de flowmetre. Par contre, l'outil Vitesse reelle est disponible.

Deroulement: Le programme demande les coordonnees (x,y) du point de surface du sondage et verifie que ce point est a l'interieur du domaine. (il peut etre en zone urbaine).
Ensuite, il faut indiquer la profondeur voulue (nombre entier).
Le resultat est affiche a l'ecran et ecrit dans un fichier SONDAGE_xx.2INCH ou xx est un numero qui vous est egalement demande. Ce fichier est visible a tout moment avec l'utilitaire 9.9.

La facturation est proportionnelle a la profondeur. Le prix au metre est visible dans le budget (8.1). L'historique des manipulations enregistre la manipulation.

Un supplement de prix (500 $) est percu si la manipulation effectuee immediatement auparavant n'est pas un sondage 2". Le motif est "la foreuse 2" a due etre ramenee sur le terrain". Il est donc dans l'interet de l'utilisateur de grouper dans le temps les sondages 2".

DISK$SPHINX:[INFOS]42.INFO

INFOS: Sondage 6" destructif

Les sondages de diametre 6" destructifs ne peuvent etre installes qu'en certains points de surface. Ils sont verticaux et leur profondeur est illimitee.
Aucune information n'est fournie sur la nature geologique des terrains rencontres (pas de carrotte et pas de resistance a l'avancement). Seul le niveau d'eau est indique dans le resultat. Par contre, il est possible d'y effectuer par la suite des essais de pompage, de flowmetre et d'utiliser l'outil Vitesse reelle.

Deroulement: Le programme demande les coordonnees (x,y) du point de surface du sondage et recherche le point disponible le plus proche. Ce point (il peut etre en zone urbaine) vous est propose, comme "solution de rechange". On peut le refuser et quitter le programme.
Ensuite, il faut indiquer la profondeur voulue.
Le resultat est affiche a l'ecran et ecrit dans un fichier SONDAGE_xx.DES ou xx est un numero qui vous est egalement demande. Ce fichier est visible a tout moment avec l'utilitaire 9.9.

La facturation est proportionnelle a la profondeur. Le prix au metre est visible dans le budget (8.1). L'historique des manipulations enregistre la manipulation.

Un supplement de prix (1000 $) est percu si la manipulation effectuee immediatement auparavant n'est pas un sondage 6" (quelqu'en soit le type exact (cf 4.3 et 4.4). Le motif est "la foreuse 6" a due etre ramenee sur le terrain". Il est donc dans l'interet de l'utilisateur de grouper dans le temps les sondages 6".

DISK$SPHINX:[INFOS]43.INFO

INFOS: Sondage 6" carotte non surveille

Les sondages de diametre 6" carottes non surveilles ne peuvent etre installes qu'en certains points de surface. Ils sont verticaux et leur profondeur est illimitee. Outre le niveau d'eau, le log stratigraphique des terrains rencontres fait partie du resultat. Il est possible d'y effectuer par la suite des essais de pompage, de flowmetre et d'utiliser l'outil Vitesse reelle.

Le fait d'etre "non surveille" signifie que la profondeur de l'ouvrage est fixee a priori. Cela signifie que l'utilisateur demande un forage de n metres

et ne peut pas interrompre l'operation en cours.

Deroulement: Le programme demande les coordonnees (x,y) du point de surface du sondage et recherche le point disponible le plus proche. Ce point (il peut etre en zone urbaine) vous est propose, comme "solution de rechange". On peut le refuser et quitter le programme.
Ensuite, il faut indiquer la profondeur voulue.
Le resultat est affiche a l'ecran et ecrit dans un fichier SONDAGE_xx.RES ou xx est un numero qui vous est egalement demande. Ce fichier est visible a tout moment avec l'utilitaire 9.9.

La facturation est proportionnelle a la profondeur. Le prix au metre est visible dans le budget (8.1). L'historique des manipulations enregistre la manipulation.

Un supplement de prix (1000 $) est percu si la manipulation effectuee immediatement auparavant n'est pas un sondage 6" (quelqu'en soit le type exact (cf 4.2 et 4.4). Le motif est "la foreuse 6" a due etre ramenee sur le terrain". Il est donc dans l'interet de l'utilisateur de grouper dans le temps les sondages 6".

L'utilitaire 9.4 permet ulterieurement de representer graphiquement (et gratuitement) le log de forage.

DISK$SPHINX:[INFOS]44.INFO

INFOS: Sondage 6" carotte surveille

Les sondages de diametre 6" carottes non surveilles ne peuvent etre installes qu'en certains points de surface. Ils sont verticaux et leur profondeur est illimitee. Outre le niveau d'eau, le log stratigraphique des terrains rencontres fait partie du resultat. Il est possible d'y effectuer par la suite des essais de pompage, de flowmetre et d'utiliser l'outil Vitesse reelle

Le fait d'etre "surveille" signifie que l'utilisateur est "present" lors des travaux. Le forage avance par tranche de 2 metres. A l'issue de chaque tranche le programme ecrit a l'ecran le POTENTIEL HYDRAULIQUE (en cours de forage le tubage n'est pas crepine) et la nature geologique des terrains traverses. L'utilisateur peut alors choisir de continuer ou d'arreter le sondage.

ATTENTION: Si un forage 6" carotte surveille est interrompu, il n'est pas possible de le prolonger ulterieurement (a moins de le refaire en entier).

Deroulement: Le programme demande les coordonnees (x,y) du point de surface du sondage et recherche le point disponible le plus proche. Ce point (il peut etre en zone urbaine) vous est propose, comme

"solution de rechange". On peut le refuser et quitter le programme.
Pour chaque tranche de 2 [m], affichage de la nature geologique et du potentiel hydraulique au fond de l'ouvrage.
L'utilisateur choisit de continuer ou d'arreter, etc.

Deux fichiers resultats sont crees:
- Comme pour les autres types de sondage mecanique, un fichier SONDAGE_xx.RES, visible a tout moment avec l'utilitaire 9.9. Ce fichier contient le log stratigraphique et le NIVEAU D'EAU.
- Un fichier POTENTIEL_xx.RES, contenant les POTENTIELS HYDRAULIQUES en cours de forage. Ce fichier est visible par l'utilitaire 9.10.

La facturation est proportionnelle a la profondeur. Le prix au metre est visible dans le budget (8.1). L'historique des manipulations enregistre la manipulation.

Un supplement de prix (1000 $) est percu si la manipulation effectuee immediatement auparavant n'est pas un sondage 6" (quelqu'en soit le type exact (cf 4.3 et 4.4). Le motif est "la foreuse 6" a due etre ramenee sur le terrain". Il est donc dans l'interet de l'utilisateur de grouper dans le temps les sondages 6".

L'utilitaire 9.4 permet ulterieurement de representer graphiquement (et gratuitement) le log de forage.

DISK$SPHINX:[INFOS]45.INFO

INFORMATIONS: Permeametre

Le permeametre a charge variable est utilise sur des carottes provenant des forages carottes 6" avec ou sans surveillance. Il permet la determination indirecte de la permeabilite verticale de l'echantillon preleve dans la carotte. La longueur de l'echantillon est de 0.5 [m].

Le programme demande le numero de la carotte (= numero du forage) ainsi que la cote du sommet de l'echantillon a prelever. Ensuite, un plan de mesure est propose; il s'agit des temps auquels on mesurera la hauteur d'eau dans le tube fin. L'utilisateur peut imposer un autre plan. La precision de la mesure est du [cm]. Le niveau d'eau initial (au temps 0) dans le tube fin est a choix mais ne peut depasser 3 [m]; le referentiel (hauteur 0) est l'exutoire du dispositif.

Le resultat consiste en l'affichage de couples temps/hauteur d'eau. Aucun fichier n'est cree: l'utilisateur doit relever les resultats a l'ecran; leur interpretation n'est pas soutenue par le logiciel.

L'essai au permeametre est non destructif. Il est donc possible de le refaire avec tout ou partie de l'echantillon.
L'utilisation du permeametre est gratuite et non inscrite dans l'historique des manipulations.

DISK$SPHINX:[INFOS]51.INFO

INFORMATIONS: Pompage longue duree

L'essai de pompage de longue duree permet de prelever un debit choisi par l'utilisateur dans un piezometre 6" (destructif ou carotte) et de connaitre le rabattement dans tout les piezometres installes, apres une periode consideree comme infiniment longue. L'operation est immediatement interrompue si le piezometre ou l'on pompe est initialement sec.

RABATTEMENT: Le rabattement est la difference de niveau d'eau entre 2 etats successifs de l'aquifere. Le niveau d'eau repond de la definition donnee au point 4 du menu. Le niveau d'eau initial correspond a l'aquifere a l'etat de repos.

Une seule pompe est disponible; on ne peut donc pas pomper simultanement dans plusieurs piezometres. Cette pompe a un debit maximum de 900 [l/mn]. Le debit reste constant durant chaque essai; les essais d'injection sont interdits.

Pour des raisons techniques, le logiciel refusera de faire un essai de pompage apres 12 heures chaque jour. Il faut donc, pour cette operation, travailler le matin; les resultats ne sont en general pas disponible avant le lendemain et sont places dans le fichier utilisateur-date.TPZ_n ou n est un numero d'ordre correspondant au n ieme essai de la journee (en general 1).
Exemple: GEHDUBOIS-9-JAN-1992.TPZ_1
L'utilitaire 9.11 permet de voir les fichiers de tournees piezometriques.

Il peut arriver qu'un piezometre soit denoye en cours de pompage; dans ce cas le resultat le concernant est "piezometre sec".
La facturation comprend un prix forfaitaire plus le nombre de piezometres que multiplie un prix unitaire. Les prix unitaires sont visibles dans le budget actualise (8.1). L'operation est inscrite dans l'historique des manipulations.

****
ATTENTION: Une fois que l'essai est commence, l'utilisateur est "ejecte" du logiciel et ne peut plus y revenir tant que cet essai n'est pas termine. Cela signifie que cette manipulation sera en general la derniere de la journee (en l'occurence, de la matinee).
****

DISK$SPHINX:[INFOS]52.INFO

INFORMATIONS: Pompage de duree limitee

L'essai de pompage de duree limitee permet de prelever un debit choisi par l'utilisateur dans un piezometre 6" (destructif ou carotte) et de connaitre le rabattement dans tout les piezometres installes, apres une serie de durees egalement choisies (plan d'echantillonage). L'operation est immediatement interrompue si le piezometre ou l'on pompe est initialement sec.

RABATTEMENT: Le rabattement est la difference de niveau d'eau entre 2 etats successifs de l'aquifere. Le niveau d'eau repond de la definition donnee au point 4 du menu. Le niveau d'eau initial correspond a l'aquifere a l'etat de repos.

Une seule pompe est disponible; on ne peut donc pas pomper simultanement dans plusieurs piezometres. Cette pompe a un debit maximum de 900 [l/mn]. Le debit reste constant durant chaque essai; les essais d'injection sont interdits.

Outre le piezometre et le debit, l'utilisateur doit choisir les temps apres t0 ou il souhaite connaitre les rabattements. Pour ce faire, on se conformera aux instructions donnees par le programme.

Pour des raisons techniques, le logiciel refusera de faire un essai de pompage apres 12 heures chaque jour. Il faut donc, pour cette operation, travailler le matin; les resultats ne sont en general pas disponible avant le lendemain et sont places dans le fichier utilisateur-date.TPZ_n ou n est un numero d'ordre correspondant au n ieme essai de la journee (en general 1).
Exemple: GEHDUBOIS-9-JAN-1992.TPZ_1
L'utilitaire 9.11 permet de voir les fichiers de tournees piezometriques.

Il peut arriver qu'un piezometre soit denoye en cours de pompage; dans ce cas le resultat le concernant est "piezometre sec".
La facturation comprend un prix forfaitaire plus le nombre de piezometres que multiplie un prix unitaire, fois le nombre de periodes d'echantillonage.
Les prix unitaires sont visibles dans le budget actualise (8.1).
L'operation est inscrite dans l'historique des manipulations.

****
ATTENTION: Une fois que l'essai est commence, l'utilisateur est "ejecte" du logiciel et ne peut plus y revenir tant que cet essai n'est pas termine. Cela signifie que cette manipulation sera en general la derniere de la journee (en l'occurence, de la matinee).
****

DISK$SPHINX:[INFOS]53.INFO

INFORMATIONS: Flowmetre (moulinet)

L'essai de flowmetre (ou moulinet) permet de prelever un debit choisi par l'utilisateur dans un piezometre 6" (destructif ou carotte) et de connaitre le flux hydraulique vertical dans le piezometre apres une periode consideree comme infiniment longue. Le profil des debits ainsi obtenu renseign sur la productivite des differents niveaux.
La pompe est toujours installee a la cote du niveau d'eau.
L'operation est immediatement interrompue si le piezometre ou l'on pompe est initialement sec.

Cette pompe a un debit maximum de 900 [l/mn]. Le debit reste constant durant chaque essai.

Pour des raisons techniques, le logiciel refusera de faire un essai de flowmetre apres 12 heures chaque jour. Il faut donc, pour cette operation, travailler le matin; les resultats ne sont en general pas disponible avant le lendemain et sont places dans le fichier utilisateur-date.FLW_n ou n est un numero d'ordre correspondant au n ieme essai de la journee (en general 1).
Exemple: GEHDUBOIS-9-JAN-1992.FLW_1
L'utilitaire 9.12 permet de voir les fichiers resultat de flowmetre.

Il peut arriver que le piezometre se denoye en cours d'essai; dans ce cas le resultat est "piezometre sec, essai interrompu". On peut alors recommencer avec un debit plus faible, mais l'operation qui a echoue est facturee.

La facturation est forfaitaire. Le prix unitaire est visible dans le budget actualise (8.1). L'operation est inscrite dans l'historique des manipulations.

****

ATTENTION: Une fois que l'essai est commence, l'utilisateur est "ejecte" du logiciel et ne peut plus y revenir tant que cet essai n'est pas termine. Cela signifie que cette manipulation sera en general la derniere de la journee (en l'occurence, de la matinee).

****

DISK$SPHINX:[INFOS]6.INFO

INFORMATIONS: Vitesse reelle

L'outil Vitesse reelle que propose SPHINX ne trouve pas d'equivalent dans la realite. Il permet de connaitre les composantes en (x,y,z) de la vitesse reelle de l'eau (vitesse de pore) dans l'aquifere suau ros, sur une serie de points le long d'un forage 2" et 6".

Durant cet essai, on considere que la presence du piezometre n'influence pas le champ des vitesses. Cela signife que les vitesses obtenues sont les vitesses de l'eau comme si le tubage n'existait pas; le resultat est donc une indication quant a la circulation (intensite et direction) dans l'aquifere. A cet egard, l'outil vitesse reelle tend a remplacer l'essai de tracage, qui ne figure pas dans le logiciel.

Pour l'utilisateur, il suffit d'indiquer le numero du forage sur le lieu duquel (mais pas DANS lequel) l'essai doit avoir lieu. Le fichier resultat porte le nom: F_n.FLX ou n est le numero du forage choisi.

Ce fichier est visible par l'utilitaire 9.13; il est de la forme:

```
Rappel des parametres du forage
Altitude    Vitesse sur x    Vitesse sur y    Vitesse sur z
Altitude    Vitesse sur x    Vitesse sur y    Vitesse sur z
Altitude    Vitesse sur x    Vitesse sur y    Vitesse sur z
...
```

L'altitude est comprise entre le niveau d'eau et le fond de l'ouvrage. Le nombre de resultats intermediaires varie selon la complexite de la lithologie.

La facturation est forfaitaire. Le prix unitaire est visible dans le budget actualise (8.1). L'operation est inscrite dans l'historique des manipulations.

DISK$SPHINX:[INFOS]7.INFO

INFORMATIONS: Ouvrage de captage

Cette operation est la derniere que doit effectuer l'utilisateur de SPHINX; elle constitue la fin de l'exercice. Une fois realisee, l'acces au outils de prospection sera interdit definitivement.

Il s'agit simplement d'indiquer les coordonnees (x,y) du lieu ou devra etre installe le captage d'exploitation, ainsi que sa profondeur. Comme pour les forages 6", le programme recherchera les coordonnees du point disponible le plus proche de celui choisi par l'utilisateur et les proposera.

En cas d'acceptation, l'exercice est termine. Il s'agit alors de se presenter avec les listings de devis, de budget, d'historique des manipulations et des resultats des diverses operations aupres d'une personne "experte".

DISK$SPHINX:[INFOS]8.INFO

INFORMATIONS: Budget

Les utilitaires de consultation ou d'impression du budget actualise, du devis ou de l'historique des manipulations sont gratuits.

Rappel: Un representation graphique de l'historique des manipulations est disponible par l'utilitaire 9.3.

DISK$SPHINX:[INFOS]91.INFO

INFORMATIONS: Carte topographique

La carte topographique est un document de base de l'exercice. Sa visualisation ou impression est gratuite. Meme si vous ne disposez pas d'une station de travail graphique (type TEKTRONIX 4014), vous pouvez imprimer le document sans le visualiser a l'ecran.

DISK$SPHINX:[INFOS]92.INFO

INFORMATIONS: Carte geologique

La carte geologique est un document de base de l'exercice. Sa visualisation ou impression est gratuite. Meme si vous ne disposez pas d'une station de travail graphique (type TEKTRONIX 4014), vous pouvez imprimer le document sans le visualiser a l'ecran.

DISK$SPHINX:[INFOS]93.INFO

INFOS: Carte des operations

Cette utilitaire permet de representer sur une carte le lieu de certaines operations effectuees par vous lors de l'exercice.
La visualisation ou impression est gratuite. Meme si vous ne disposez pas d'une station de travail graphique (type TEKTRONIX 4014), vous pouvez imprimer le document sans le visualiser a l'ecran.

DISK$SPHINX:[INFOS]94.INFO

INFORMATIONS: Log de forage

Cet utilitaire permet de representer graphiquement un log de forage 6".
Son utilisation est gratuite. Meme si vous ne disposez pas d'une station de travail graphique (type TEKTRONIX 4014), vous pouvez imprimer le document sans le visualiser a l'ecran.

DISK$SPHINX:[INFOS]95.INFO

INFORMATIONS: Interpretation s. elec.

L'interpretation d'un sondage electrique concerne les fichiers crees au point 3.1 du menu. L'utilisation de ce programme n'est pas facturee.

Il est indispensable de travailler sur un terminal ou station GRAPHIQUE.

Pour interpreter le sondage en question, le programme demande des valeurs de resistivite et d'epaisseur. Apres calcul, il vous restera a comparer le sondage experimental au sondage d'essai et eventuellement a recommencer jusqu'a obtention d'un calage satisfaisant.

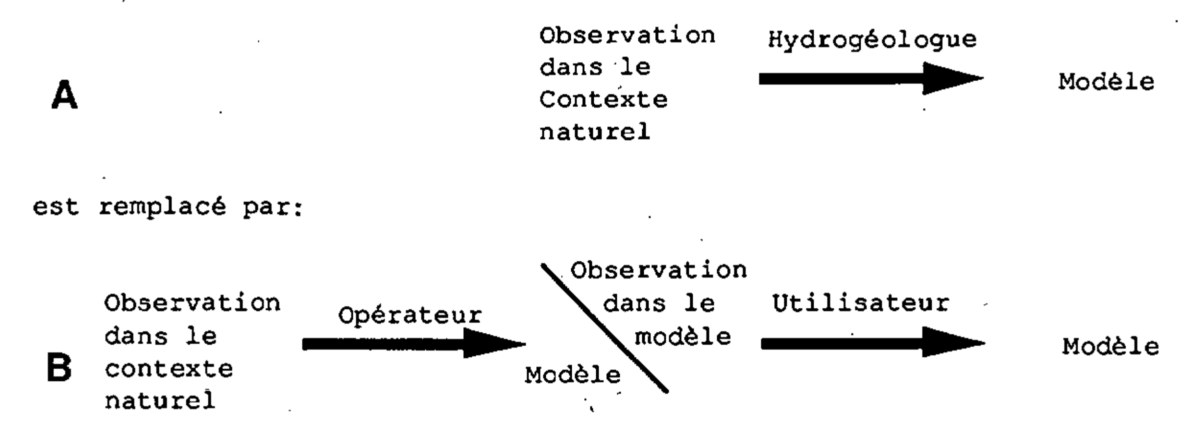
Le programme conserve en permanence les parametres de l'interpretation la plus recente dans un fichier SONDAGE_n.INT ou n est le numero du sondage.
Les fichiers d'interpretation sont des aide-memoire et sont visibles en (9.7).

Conclusions

Ce travail présente la particularité de ne pas être une contribution à la connaissance de telle ou telle région, ni à un aspect méthodologique. En matière de simulation, les conclusions consistent en des perspectives de développement. Cependant, l'expérience de la simulation permet, sous forme des remarques suivantes, d'apporter un éclairage peut-être différent sur l'activité "normale" des hydrogéologues et des naturalistes.

Généralement, les hydrogéologues fabriquent des modèles pour représenter et prévoir le comportement des systèmes réels qu'ils étudient. La qualité des modèles construits vaut alors leur aptitude à décrire avec une précision suffisante et fixée à l'avance le système réel sous l'aspect envisagé (circulation d'eau, de matière dissoute ou en suspension, de chaleur,...). D'une manière plus générale, il n'est pas de profession naturaliste qui ne consiste à fabriquer des modèles; toute donnée nouvelle fait immanquablement l'objet d'une interprétation, c'est-à-dire qu'elle participe à l'élaboration du modèle que construit le naturaliste. Ce modèle est déclaré valide lorsqu'il acquiert une autonomie suffisante en regard du but poursuivi, c'est-à-dire lorsqu'on peut lui prêter la qualité d'être prévisionnel.

Dans SPHINX, le processus



L'opérateur a la tâche délicate de substituer des modèles à la nature; heureusement pour lui, il a toujours raison aux yeux de l'utilisateur, c'est-à-dire que les modèles construits font foi pour ce dernier. L'apport pédagogique de SPHINX vaut donc trés exactement la capacité des modèles de l'opérateur à reproduire le comportement de la nature sous les aspects concernés. Dans le cas favorable, nous admettons l'equivalence des processus **A** et **B**, ce qui mène à conclure que:

- L'interprétation (la modélisation) ne se base pas forcément sur des observations mais plus généralement sur des acquis, lesquels peuvent provenir d'une phase antérieur de modélisation; l'enchaînement acquis - interprétation peut se répéter indéfiniment, chaque interprétation nouvelle constituant l'acquis d'une interprétation ultérieure. Il faut y voir un genre de problème d'échelle.
- Dans cette perspective l'observation naturaliste n'est que l'acquis à l'échelle la plus généralement traitée. Nous pouvons la définir comme suit: L'observation naturaliste est un modèle considéré comme bon, a tel point qu'on peut l'utiliser pour fabriquer un modèle d'un "ordre supérieur".

Cette remarque permet de soulager la conscience des opérateurs qui nous succèderons. Elle a aussi pour corollaire d'attirer l'attention des hydrogéologues travaillant avec des observations sur le fait que ces observations ne sont généralement exemptes d'une composante interprétative. Il est nécessaire de décider que cette composante est nulle; ce n'est pas pour autant qu'elle l'est.

Les perspectives de développement de SPHINX concernent le nombre, la nature et la qualité des modèles qu'a introduit l'opérateur. Les améliorations ("faire en sorte que les observations et les données issues des modèles ressemblent davantage aux observations et données issues d'un système réel") prioritaires nous semblent être les suivantes:

- Introduire plusieurs domaines réalistes.
- Sondages et trainés électriques tenant compte des variations latérales du champ Résistivité électrique vraie.
- Remplacer les programmes de modélisation hydrodynamique (nappe captive) par des programmes permettant la modélisation de nappes libres, plus appropriés au domaine réaliste actuel. Dans ce cas redéfinir le niveau d'eau.
- Introduire l'essai de traçage dans la panoplie des outils. Une solution peu gourmande en temps de calcul est souhaitable.
- Facturation non linéaire des forages.
- Forages destructifs donnant des indices de la nature géologique des terrains rencontrés.
- Les paramètres hydrogéologiques pourraient varier dans chaque élément selon une fonction quelconque. Il s'agirait de définir des "macro-éléments" à l'intérieur desquels une fonction fixerait la valeur des paramétres. Notamment, la perméabilité pourrait être calculée aux nœuds ou en tout pointà partir d'une fonction décrivant K sur telle ou telle région du domaine réaliste. K serait calculée de méme aux points de Gauss lors de la construction des modèles hydrodynamiques; les fichiers décrivant D3 ne s'en trouveraient pas alourdis.
- En rapport avec la remarque précédente, il existe dans la version actuelle de SPHINX une disparité entre la forme quadratique des éléments et la valeur constante des paramètres dans chaque élément.
- A l'heure actuelle, les nœuds du milieu des arêtes verticales ne servent à rien; leur integration dans le système favorise une amélioration dans le sens d'arètes non verticales.

GLOSSAIRE

Les définitions données ci-dessous sont spécifiques à l'usage qui en est fait dans cet exposé. On ne doit y voir aucune portée dépassant le cadre du logiciel.

Champ	Partie de l'espace sans substance propre et ne se manifestant que par des effets. Les champs de paramètres constituent le domaine réaliste.
Configuration	But pour l'utilisateur, contraintes et moyens d'y parvenir. En pratique, but + ensemble de modèles.
CC	Coefficient de connaissance valant le nombre de niveaux de la CSTM dont l'épaisseur est connue.
CI	Coefficient d'intérêt relatif à un point de D2, valant la transmissivité de la CSS.
CSS	Colonne stratigraphique supposée. Vecteur des faciès géologiques et des épaisseurs en tout (x,y) de D2, tel qu'il est connu à un moment donné. Au contraire de la CSR et de la CSTM, la CSC évolue en cours de prospection.
CSR	Colonne stratigraphique réelle. Vecteur des faciès géologiques et des épaisseurs au droit d'un (x,y) quelconque de D2. C'est une transformation géométrique de la CSTM.
CSTM	Colonne stratigraphique théorique maximale. Vecteur de tous les faciès géologiques et des épaisseurs correspondantes pouvant (prouvés ou raisonnablement supposés) se rencontrer dans D3.
Domaine réaliste (D3)	Ensemble de champs de paramètres. C'est un élément des schémas abstraits fabriqués par l'opérateur. Chaque modèle en utilise tout ou partie. La face supérieure de D3 est appelée **D2**.
Loi physique	Elément d'un schéma abstrait, utilisant des paramètres afin de produire des variables, par le calcul, lorsque le modèle est réalisé. Les paramètres sont lus dans le domaine réaliste.
Logiciel	Formalisme de stockage dans l'ordinateur, d'un but et de divers schémas abstraits. Lorsqu'il fonctionne, il produit des modèles. C'est un cas particulier de système de simulation.
Modèle	Concrétisation, même temporaire, d'un schéma abstrait donné.

Niveau d'eau Dans un forage SPHINX crépiné sur toute sa hauteur, le niveau d'eau vaut la moyenne arithmétique des potentiels hydrauliques calculés entre le sommet et la base de l'ouvrage, pondérée par l'épaisseur des niveaux traversés et par leurs perméabilités respectives.

Niveau de la nappe Le niveau de la nappe est le potentiel hydraulique calculé au sommet du domaine réaliste. L'utilisateur ne dispose d'aucun moyen pour déterminer le niveau de la nappe; il ne peut connaitre que le niveau d'eau.

Observation Catégorie d'outils et donc de modèles résultant de la concrétisation d'un schéma abstrait ne comportant pas de loi physique.

Opérateur Personne dont le rôle est, du point de vue de l'utilisateur, de substituer au système réel un ensemble de modèles.

Outil Modèle. La trace laissée par un modèle constitue le résultat de l'application de l'outil correspondant.

Paramètre Qualité ou grandeur scalaire, vectorielle ou tensorielle, désignée ou quantifiée en tout point d'un champ dont la forme correspond à celle du domaine réaliste. Les paramètres ne varient ni dans le temps ni sous l'action de l'utilisateur, à la différence des variables.

Prospecteur Personne participant à l'exercice de simulation. Il fait fonctionner le logiciel. Participant, élève, utilisateur.

Rabattement Différence de niveau d'eau dans un piézomètre entre 2 états de l'aquifère.

Schéma abstrait Champs de paramètres, lois physiques et conditions aux limites pouvant être transformés en modèle.

SPHINX Nom du logiciel.

Syatème de simulation Toute concrétisation du schéma abstrait construit par l'opérateur qui n'est pas le système réel dont il s'inspire. Prend le nom de logiciel si la concrétisation est réalisée par l'ordinateur.

Variable Grandeur scalaire ou vectorielle constitutive d'un modèle. L'action de l'utilisateur assigne une valeur aux variables.

BIBLIOGRAPHIE

BARRIOS L.A., TACHER L. (1986): Etude gravimétrique et électrique du système fluvio-glaciaire de Pontarlier. Dipl. Université de Lausanne, non publié.

CIARLET P. (1978): The finite element method for elliptic problems - Studies in mathematics and its applications, North Holland Publishing.

CHAUVE P., CHARLES G., LEONETTI A. (1982): A propos des pertes du Doubs. - *Annales scientifiques de l'Université de Franche-Comté*. fasc. 4, 4ème série, pp. 13-25

CHAUVE P., JACOUEMIN PH., MANIA J. (1986): Représentation des écoulements en milieu karstique de zone plissée: exemple des hauts bassins du Doubs et de la Loue. - *Bull. Soc. géol. France* (8), t. II, n° 4, pp.645-652.

CLAUDON G. (1977): Etude hydrogéologique de la plaine de Pontarlier. Thèse Université de Franche-Comté.

DE MARSILY G. (1981): Hydrogéologie quantitative. Masson, Paris, 215 p.

DETAY M., POYET P. (1989): La place de l'informatique dans les géosciences, évolution et perspectives. - *Géologues*, 91 (1989.4), pp.37-49

DHATT G., TOUZOT G. (1984): Une présentation de la méthode des éléments finis. Collection Université de Compiègne, Maloine SA ed., Paris, 543 p.

DURAFFOURG, PALACIO (1981): Etude géologique, géophysique et hydrogéologique du synclinal de Frasnes- Bonnevaux. Thése, Université de Franche-Comté.

GEORGES P.L. (1991): Génération automatique de maillages. Application aux méthode d'éléments finis. Masson et Cie, Paris.

GHOSH D. P. (1971): Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. - *Geophys. Prospect.*, 19, pp. 769-775

HARR M. E. (1962): Correspondence between Seepage and Flow of Electric Current. Groundwater and seepage. Mac Graw Hill, p.142

JAECKLI H. (1970): La Suisse durant la dernière période glaciaire. Carte au 1/500'000

KELLY W. E. FROHLICH R. K., (1985): Relations between aquifer electrical and hydraulic properties. - *Ground Water*, 23, 2, pp. 182-189

KIRALY L. (1985): FEM301 - A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation. CEDRA, Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs. Technical report 84-49, 95 p.

KIRALY L. (1977): La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition. Thèse, Université de Neuchâtel. - *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie* 1977, n° 2

KIRALY L. (1992): An efficient technique to calculate the local coordinates for given global coordinates in higher order finite elements. - *Bull. Centre d'Hydrogéologie* n° 11

KOEFOED O. (1982): Geosounding principles, 1. Resistivity sounding measurements. Elsevier, Amsterdam, 276 p.

LAFFITTE P. et al. (1972): Traité d'informatique géologique. Masson et Cie, Paris, 282 p.

LIAKOPOULOS A.C. (1964): Theoretical aspects of the flow of water through anisotropic unsatured soils. - *Bull. des Sc. Hydr.*, vol. 1, pp 62-70

MEYER DE STADELHOFFEN C. (1983): L'interprétation graphique des sondages électriques. - *Bull Inst. Geophys. Univ. Lausanne* n°4, 40 p.

NEUMAN S.P. (1984): Determination of horizontal aquifer anisotropy with trhee wells. - Ground water, Vol. 22, N° 1, p 66.

NOUGIER J. P. (1983): Méthodes de calcul numérique. Masson ed., Paris, 314 p.

OLIVIER R. (1971): Digitalisation du relief de la Suisse romande. - *Bull Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 70, p. 334

POYET P., DETAY M. (1988): Un système expert d'aide à l'implantation de forages en hydraulique villageoise. Rapport de recherche INRIA, n° 936, 36 p.

POYET P., DETAY M. (1989): HYDROLAB®: An example of a new generation of compact expert systems. - *Computers & Geosciences*, Vol. 15, n° 3, pp. 255-267

RAVIART P.A., THOMAS J.M. (1988): Introduction à l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles. Masson et Cie, Paris.

ROBERT A., GEX P. (1985): Interprétation géophysique rapide. - *Bull Inst. Geophys. Univ. Lausanne* n°6, 72 p.

ROUSSELOT D. (1976): Proposition pour une loi de distribution des perméabilités ou transmissivités. Rapport BRGM, Service géologique Jura-Alpes

STEELS L. (1990): Components of expertise. - *AI magazine*, American Association for Artificial Intelligence. Summer 1990

SURANY A. P. (1985): A simple algorithm for determining whether a point resides whithin an arbitrarily shaped polygon. NATO ASI series. Vol F17. Fundamental algorithms for computer graphics. Springer-Verlag, Berlin.

TACHER L. (1990): SPHINX: Un programme de simulation, d'acquisition et de stockage des connaissances en hydrogéologie appliquée. - *Géologues* n° 93.

TACHER L. (1990): Calcul de potentiels hydrauliques dans un piézomètre crépiné sur toute sa hauteur. Cas d'un aquifère multicouches. - *Bull. Centre d'Hydrogéologie* n°9, pp. 47-50

TACHER L. (1992): Recherche de l'élément fini contenant un point de coordonnées glogales connues. - *Bull. Centre d'Hydrogéologie* n° 11

U.S.G.S (1978): Development of the PROSPECTOR consultation system for mineral exploration. SRI Projects n° 5821 & 6415. Final report, 193 p.

VANNIER M., WOODTLI R. (1977): Teaching prospecting for minerals by simulation techniques assisted by computer. Communication présentée au 25ème Congrès Géologique International, Sydney, 1976, sect. 17 A

VANNIER M., WOODTLI R. (1977): La simulation assistée par ordinateur dans l'enseignement de la recherche minière (Esquisse d'une théorie). Communication présentée au symposium international de Montreux, 1977

Remerciements

En hydrogéologie, il est rare qu'un travail n'ait pas pour objet un approfondissement de la connaissance d'un système aquifère ou une contribution à un aspect théorique ou méthodologique. C'est le cas ici et je remercie chaleureusement le Prof F. Zwahlen, Directeur du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, d'avoir permis, encouragé et soutenu l'expérience de la simulation.

Outre les modèles hydrodynamiques FEN1 et FEN2 qu'il a mis à ma disposition, le Prof. L. Kiraly, directeur de recherche du Centre d'Hydrogéologie, a suivi l'évolution de mes recherches depuis le début. Chacune des nombreuses discussions que nous avons eu a été un élargissement des perspectives de ce que pouvait être SPHINX. Je vois dans l'éclaircissement permanent qu'il a apporté à mon travail la forme la plus active de l'encouragement et du soutien.

MM le Prof. O. Besson, professeur à l'Institut de Mathématiques de l'Université de Neuchâtel, le Dr Y. Emsellem, directeur du GEOLAB à Sophia-Antipolis et le Dr W. Hürlimann, deputy manager à COLENCO Ltd ont accepté d'être membres du jury de thèse. Les entretiens que j'ai eu avec eux ont été autant d'éclairages différents sur SPHINX, dont la forme actuelle est empreinte de leurs observations ou conseils précieux. Je leur exprime ici toute ma reconnaissance.

Le développement de "l'œil du maître" a commencé par recueillir le savoir de plusieurs personnes expertes en matière de prospection d'eau; je remercie chaleureusement les prof. I. Muller et A. Parriaux d'avoir bien voulu être longuement questionnés à ce propos. Le formalisme de stockage des connaissances m'a été présenté par J. P. Muller, professeur à l'Institut d'Informatique de l'Université de Neuchâtel; je le remercie vivement du temps consenti.

Au cours de ces années, j'ai largement usé ou abusé du savoir des mathématiciens. Parmi eux, j'ai plaisir à remercier le prof. O. Besson et le Dr E. Zuur. Les informaticiens n'ont pas non plus été épargnés par les multiples problèmes inhérents à la fabrication d'un logiciel. A cet égard, le département de calcul de l'Université de Neuchâtel, par les personnes de MM F. Burri, R. Choffat et J.P. Maradan, à qui va ma gratitude, a été d'un grand secours.

Last but not least, parents, amis et collègues dont la seule présence est un encouragement. A tous, un grand merci.

ANNEXE 1

Potentiels hydrauliques dans un piézomètre crépiné sur toute sa hauteur. Cas d'un aquifère multicouches.

Dans le cas où le référentiel de mesure piézométrique coïncide avec le référentiel topographique, la mesure d'une hauteur piézométrique représente le potentiel hydraulique au lieu géométrique du crépinage. Dans le cas où le piézomètre n'est ouvert qu'à sa base, on mesure donc le potentiel en cet endroit. Dans les autres cas, la valeur mesurée est une composition des potentiels existant en tout point du domaine, puisque la présence du piézomètre permet des écoulements qui modifient l'ensemble de la répartition spatiale des potentiels. A l'exception du cas où le piézomètre crépiné traverse des régions à potentiels égaux, la détermination du potentiel à l'intérieur du tubage n'admet pas de solution analytique simple. En considérant qu'un piézomètre est installé verticalement, le problème concerne principalement les régions d'exutoires ainsi que les aquifères superposés. On a procédé ici à une série de simulations sur ordinateur, qui illustrent sur un exemple simple les difficultés rencontrées lorsqu'on veut estimer un potentiel ponctuel par une mesure dans ce type d'équipement. Les calculs ont été effectués par la méthode des éléments finis dans un espace tridimensionnel; les résultats calculés peuvent être assimilés à des résultats expérimentaux (FEN1: Programme de calcul par éléments finis des écoulements souterrains en 1, 2 et 3 dimensions - Régime permanent - Nappes captives).

Description du modèle

La géométrie et la discrétisation (éléments finis quadratiques 3D) du domaine d'étude sont données à la figure 1. Deux aquifères captifs sont séparés par un niveau imperméable. En partant du haut, les caractéristiques sont les suivantes:

Aquifère 1:	K1= 10E-03 [m/s]	e1= 30 [m]
Niveau imperméable:	K2= 10E-20 [m/s]	e2= 10 [m]
Aquifère 2:	K3= 10E-03 [m/s]	e3= 50 [m]

Un piézomètre crépiné sur toute sa hauteur est implanté au centre du domaine. Il est représenté par des éléments finis unidimensionnels à très haute perméabilité (Kp = 100 [m/s]; des essais systématiques ont indiqué que cette valeur, ou plus, permet d'obtenir un potentiel pratiquement constant dans le tubage).
Les conditions aux limites sont de type Dirichlet: Un potentiel des 999,00 m est imposé à tous les nœuds des limites latérales de l'aquifère supérieur. L'aquifère inférieur est légèrement en charge, avec un potentiel imposé de 1000,00 m en tout nœud de ses limites latérales. Les nœuds situés aux limites et à mi-hauteur de la rangée d'éléments constituant le niveau imperméable ont un potentiel imposé de 999,50 m. Le toit et la base du domaine sont imperméables. Le modèle fonctionne en régime permanent.

ANNEXE 1

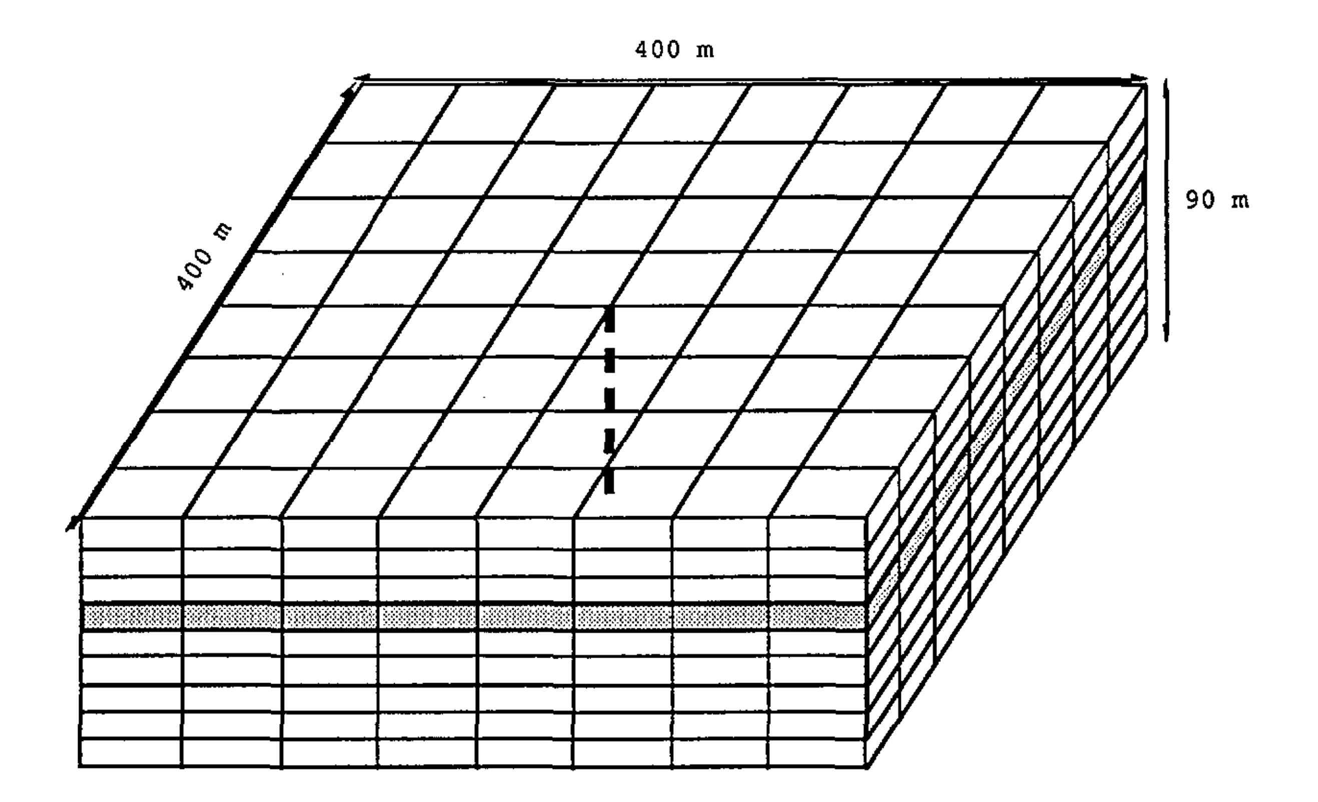


Figure 1: Géométrie et discrétisation par éléments finis du domaine d'étude.

Résultats

On procède à une série d'essais en faisant varier uniquement la profondeur du piézomètre. On relève ensuite les valeurs calculées en tout point du piézomètre ainsi que sous lui, jusqu'à la base du domaine. L'ensemble des résultats est donné par la figure 2. Dans la figure 3, on a extrait les valeurs calculées uniquement à l'intérieur du piézomètre (constantes).

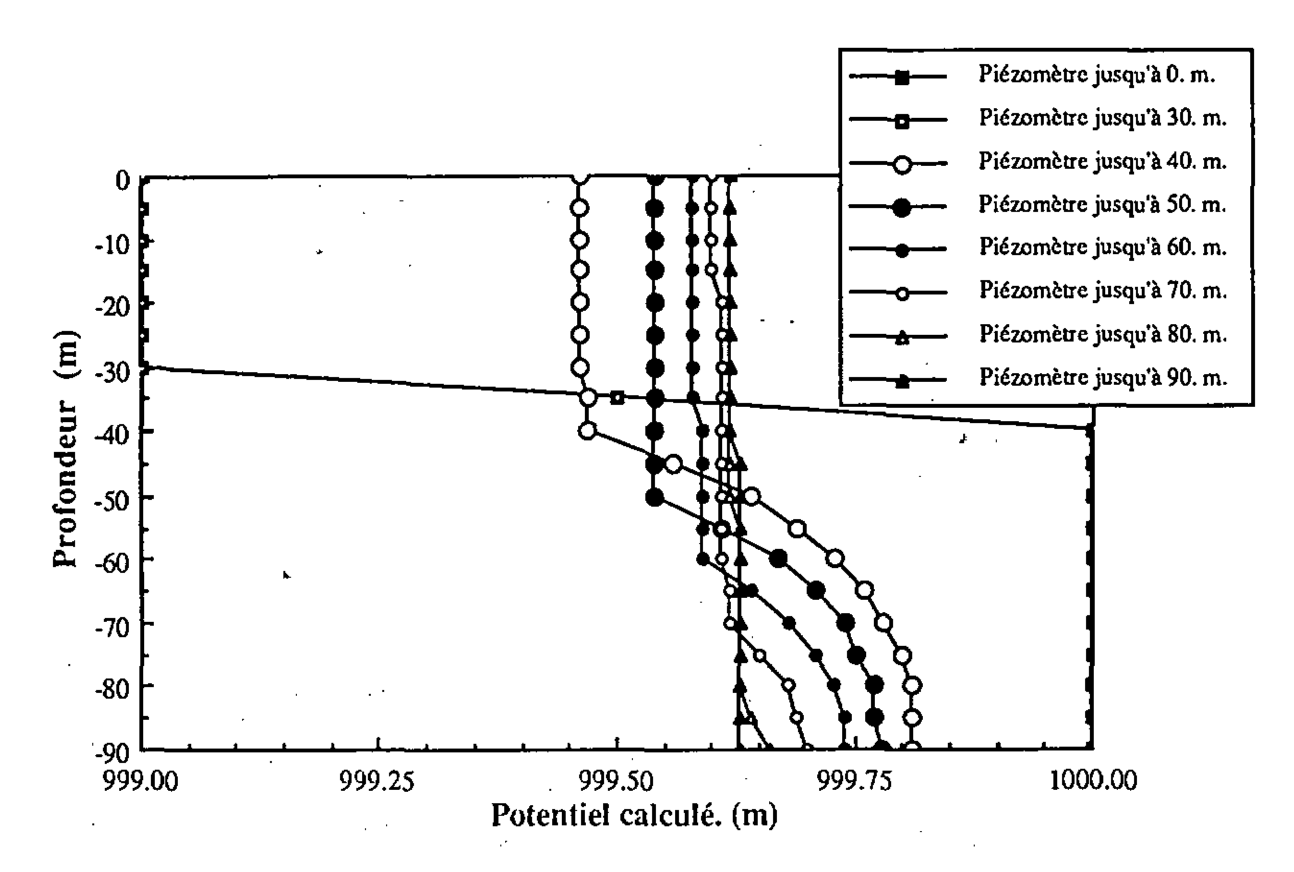


Figure 2: Potentiel hydraulique calculé dans et sous un piézomètre en fonction de sa profondeur.

Observations

- Quelque soit la profondeur du piézomètre, la valeur de potentiel calculée à l'intérieur de celui-ci est toujours comprise entre les valeurs extrêmes du domaine en son absence. (900 < Hp < 1000).
- Le potentiel à l'intérieur du piézomètre en fonction de sa profondeur de pénétration dans l'aquifère inférieur tend vers une valeur asymptotique, dont la valeur, étant donné que la présence du piézomètre modifie le champ de potentiels en tout point, ne peut être obtenue par une formule de pondération.
- Les mêmes essais ont été répétés avec des perméabilités différentes. Les variations de ce paramètre n'ont pas induit de modification des valeurs calculées à l'intérieur du piézomètre.

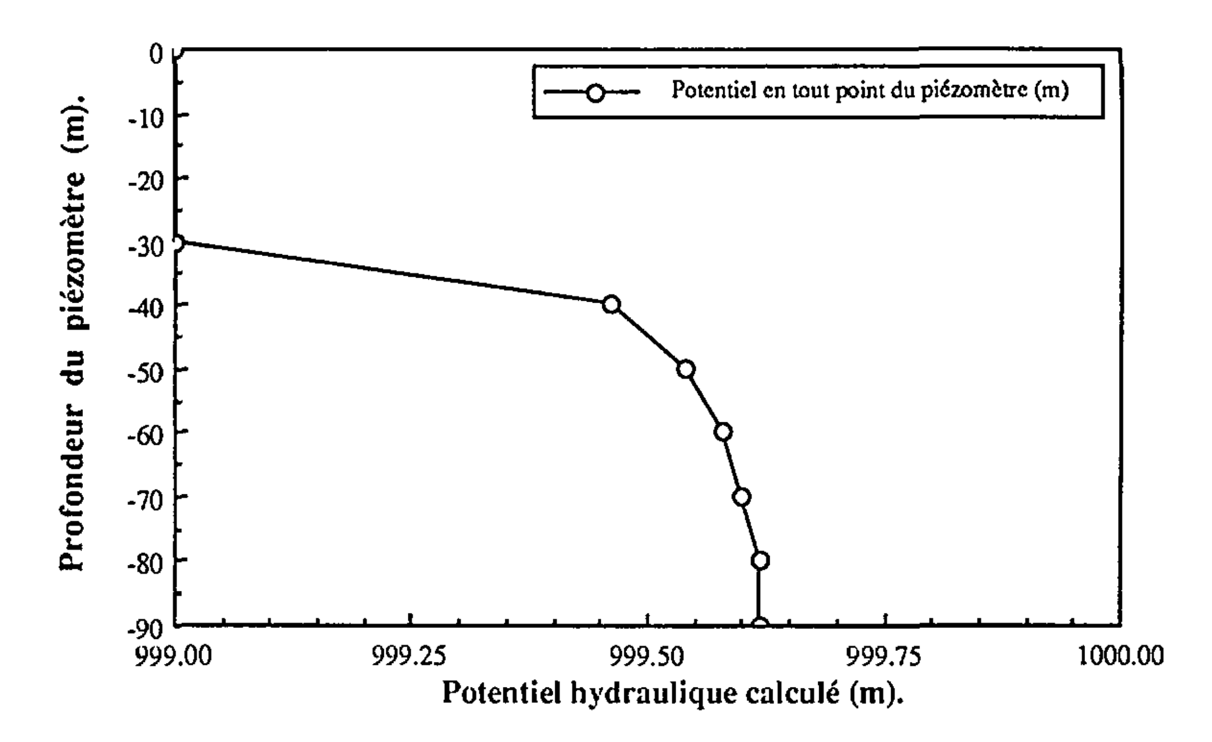


Figure 3: Potentiel hydraulique calculé en tout point à l'intérieur du piézomètre, en fonction de sa profondeur.

De ces quelques calculs, on pourra retenir que lorsqu'un piézomètre crépiné sur toute sa hauteur traverse un champ de potentiels hydrauliques non constant (zone d'exutoire, ou d'une manière générale tout milieu hétérogène), et du fait que la présence de l'équipement modifie la géométrie de ce champ, la mesure piézométrique ne peut pas renseigner de manière quantitative sur la valeur et la distribution spatiale des potentiels ponctuels. Il s'ensuit que le niveau d'eau dans le tubage n'indique pas non plus la hauteur de la nappe (cas particulier de potentiel: $h = z$).

ANNEXE 2

Nature du modèle hydrodynamique et définition du niveau de la nappe.

Nature des modèles hydrodynamiques pouvant être produit par SPHINX.

En tout point de D3, les paramètres perméabilité et coefficient d'emmagasinement spécifique sont liés aux variables potentiel hydraulique, flux et débit par l'équation différentielle (LP1):

$$S_s \frac{\delta h}{\delta t} + \operatorname{div} \vec{v} + Q = S_s \frac{\delta h}{\delta t} + \operatorname{div}\left(-K\, \overrightarrow{\operatorname{grad}}\, h\right) + Q = 0$$

où S_s = Coefficient d'emmagasinement spécifique $[L^{-1}]$
h = Potentiel hydraulique $[L]$
$\vec{v}$ = Flux hydraulique $[LT^{-1}]$
K = Perméabilité $[LT^{-1}]$
Q = Débit injecté ou prélevé $[L^3T^{-1}L^{-3}]$

L'écoulement représenté est donc laminaire, le milieu est saturé, la perméabilité ne dépend pas du potentiel hydraulique. Les conditions aux limites nécessaires à l'application de cette équation sont des valeurs imposées localement de potentiel hydraulique et débit, représentatives du contexte (facteurs climatiques, biologiques et géomorphologiques locaux). Elles sont fixées par l'opérateur et ne varient pas dans le temps, de sorte que le modèle ne présente pas de variations spontanées.

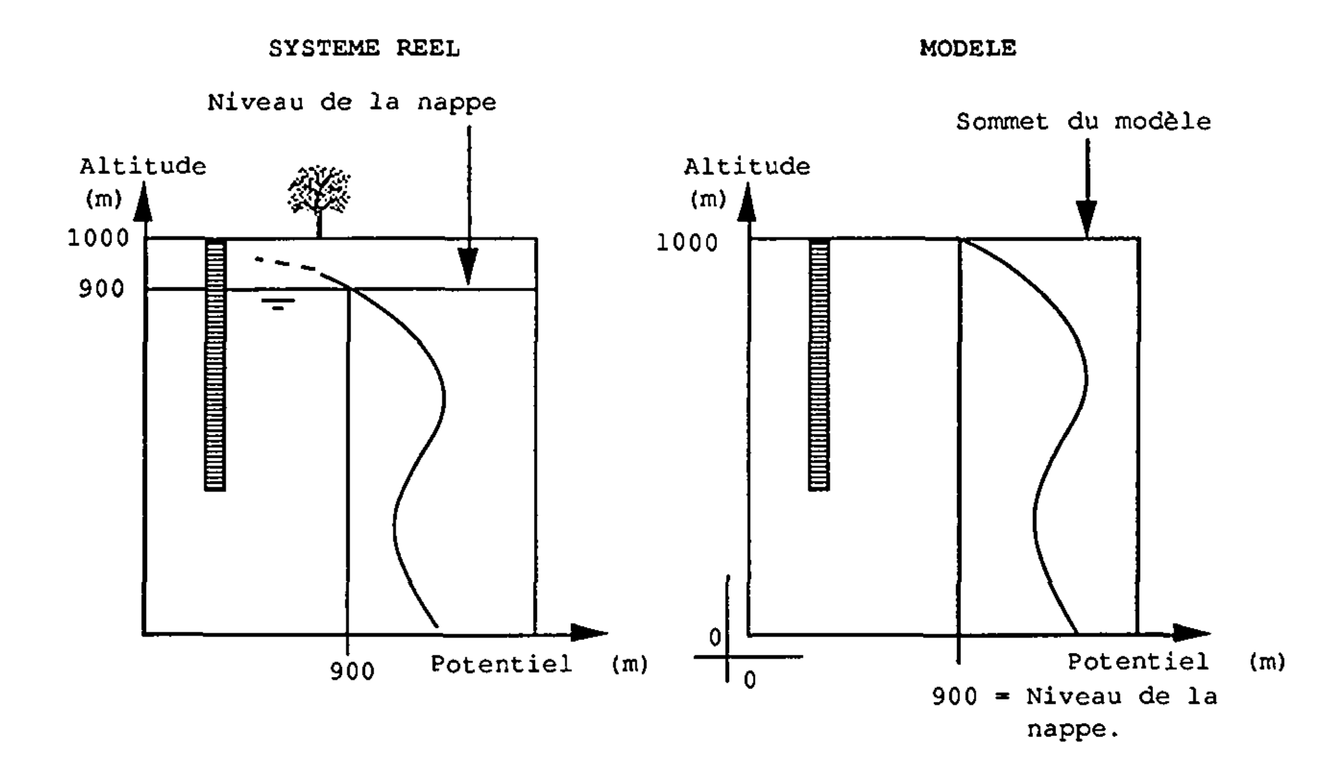
Puisque la forme des champs de paramètres est invariante et puisque LP1 decrit l'écoulement d'eau dans la zone saturée, on conclue que "le modèle est partout saturé d'eau" et représente le comportement d'un aquifère captif.

Quelque soit le type de système réel que l'on veut représenter, il faut donner une définition du "niveau de la nappe".

Définition: Dans SPHINX, le niveau de la nappe vaut le potentiel hydraulique à la surface de D3, avec la condition que les référentiels sont identiques pour les altitudes et les potentiels.

Si l'opérateur s'inspire d'un système réel du type nappe libre, il doit indiquer à l'utilisateur que du point de vue hydrodynamique, l'aquifère est considéré comme captif:

ANNEXE 2



Remarque: Le calcul selon LP1 est éffectué à priori par l'opérateur; le champ des variables potentiel hydraulique et flux hydraulique, non influencé par l'action de l'utilisateur (i.e essai de pompage) est stocké. C'est cet "état de repos" qu'exploitent les outils sondage mécaniques et essais de pompage de durée limitée.
Sous l'action de l'utilsateur (i.e essai de pompage), le modèle est également produit selon LP1; LP1 est vraie partout dans D3 et en toutes circonstances.

Remarque: Nous n'utilisons pas le terme de "surface piézométrique", qui signifie "surface déterminée par des piézomètres". Or, comme le montre l'annexe 1, une telle surface peut être sensiblement différente du niveau de la nappe en l'absence de tout équipement.

ANNEXE 3

Définition et validité du terme de "rabattement" dans SPHINX

Définition: Le rabattement est la différence de niveau d'eau, dans un même piézomètre, entre 2 états successifs de l'aquifère.

Le terme de "niveau d'eau" correspond à la définition du § 3.3.6

Nous avons toutefois procédé à un essai simple montrant dans quelle mesure le rabattement dans un aquifère libre peut être apprécié par le résultat d'un modèle 3D du type nappe captive.

Description du modèle

Soit un parallépipède de dimensions 400 x 400 x 90 m. La porosité du matériel le remplissant est de 0.1. Rien ne s'oppose à la circulation de l'eau remplissant tous les pores; K = 100 [m/s].

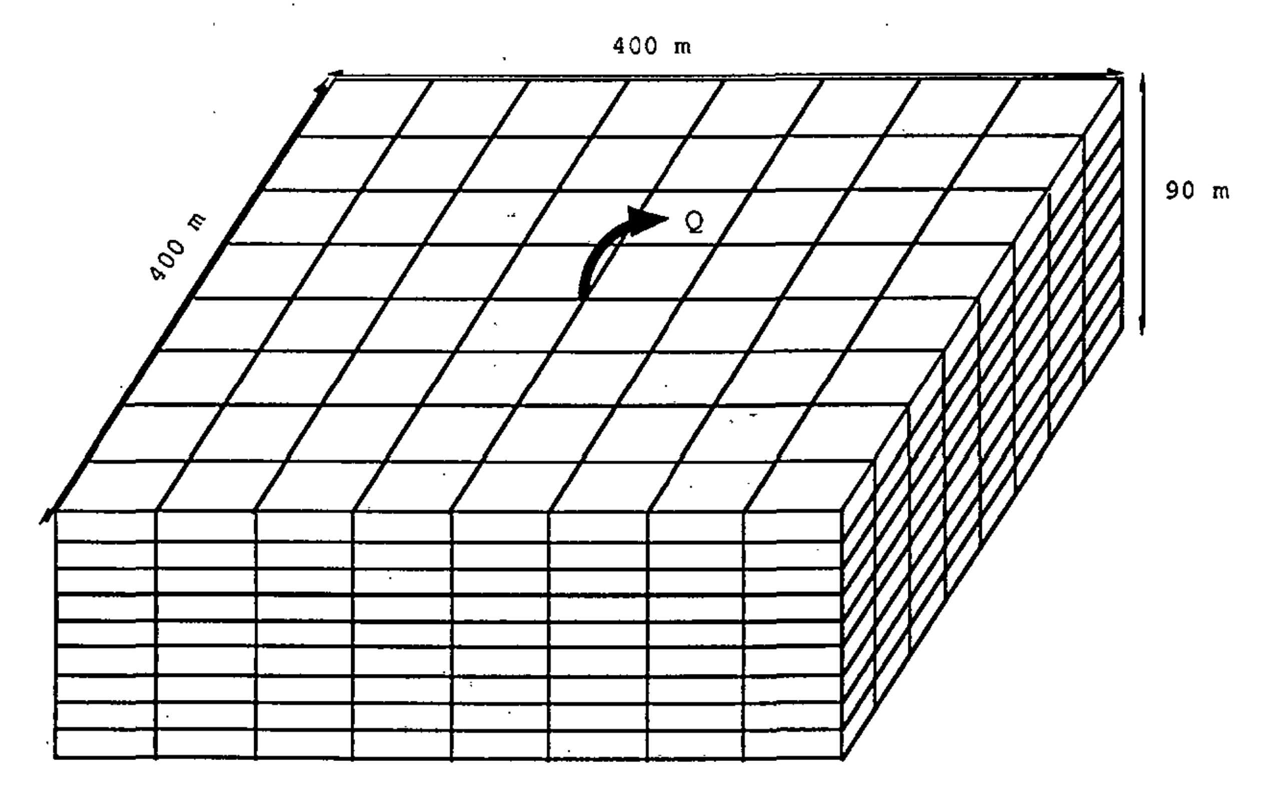


Figure 1: Géométrie et discrétisation par éléments finis du domaine d'étude.

ANNEXE 3

Calcul intuitif.

Prélevons 1 [m^3/s] d'eau pendant 10 heures, soit 36'000 [m^3]. Le niveau d'eau a alors baissé de (1/.01)*(36000/160000) = 2.25 [m].

Calcul par éléments finis

La discrétisation (éléments finis quadratiques 3D) du domaine d'étude est donnée à la figure 1. Cette géométrie ne varie pas dans le temps. Les caractéristiques sont les suivantes:

K1= 100. [m/s]   S = 0.1 [1/m]

Un potentiel des 493,00 m est imposé à tous les nœuds pour l'état initial. Comme condition aux limites: Q = 1.0 [m^3/s] au nœeud supérieur central. Après 10 heures, le modèle présente un potentiel hydraulique de 492.976 [m] en tout point.

Calculons l'integrale des différences de potentiel entre états initial et final sur toute l'épaisseur du modèle à la verticale du point de pompage.

On obtient (493.000 - 492.976) * 90 = 2.16 [m].

Nous considèrerons cette approximation comme satisfaisante dans le cas présent. Sa validité est grandement conditionnée par l'importance de la chute de potentiel en regard de l'épaisseur.totale du modèle.

Dans cet exemple, le rabattement vaut l'integrale des différences de potentiel entre états initial et final, sur toute l'épaisseur du modèle, à la verticale du point de pompage.

La chute de potentiel est, dans un aquifère captif, répartie sur tout le volume de l'aquifère, d'òu la faible valeur de cette chute (0.024 [m]).
L'approche présentée revient à faire la somme de toutes les pertes de potentiel et à concentrer la valeur obtenue au sommet du modèle. On voit que dans le cas présent on arrive ainsi à représenter le comportement d'un aquifère libre. Ce procédé n'est pas généralisable: Si les perméabilités du modèle sont faibles ou si le milieu est hétérogêne, le volume n'est plus équipotentiel et nous ne savons pas où faire la somme des chutes de potentiel, ni où la reporter.

ANNEXE 4

Flux hydraulique circulant dans une tranchée avec ouvertures sur toute sa hauteur. Illustration.

Soit le dispositif suivant: Un réseau d'éléments finis quadratiques bidimensionnels dans le plan vertical, représenté à la figure 1. Une colonne d'éléments 1D à haute perméabilité est ajoutée sur un partie de l'épaisseur du réseau. On assigne des perméabilités représentatives de 2 aquifères superposés, séparés par un niveau imperméable; des conditions de potentiel sont imposées sur les 2 cotés du dispositif, la base et le sommet étant imperméables.

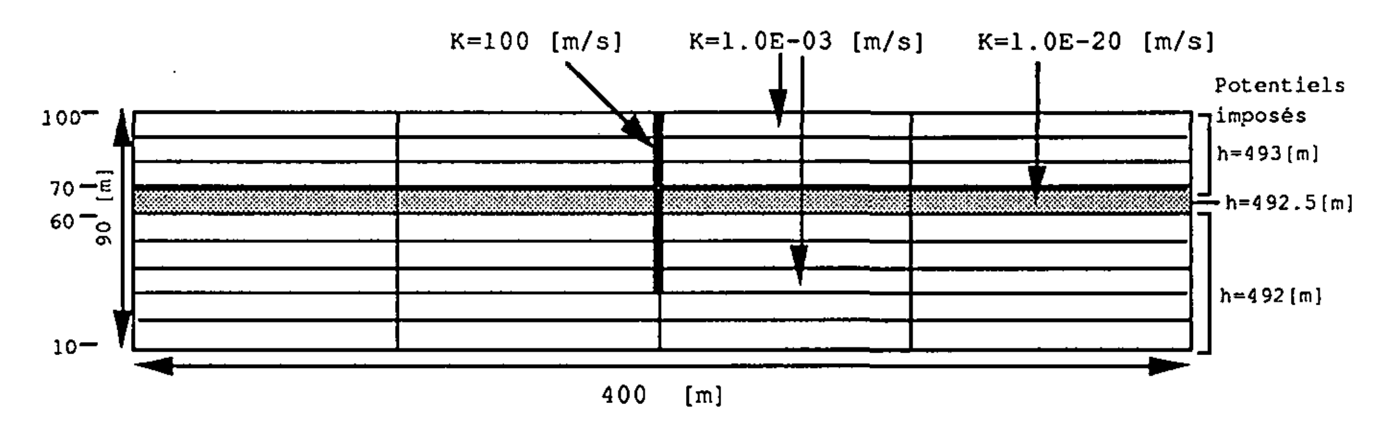


Figure 1: *Réseau d'éléments finis, perméabilités et conditions aux limites. En trait fort, les éléments 1D.*

La figure 2 représente le modèle produit par calcul. On remarque que l'aquifère supérieur se vide dans l'aquifère inférieur, uniquement par les éléments 1D.

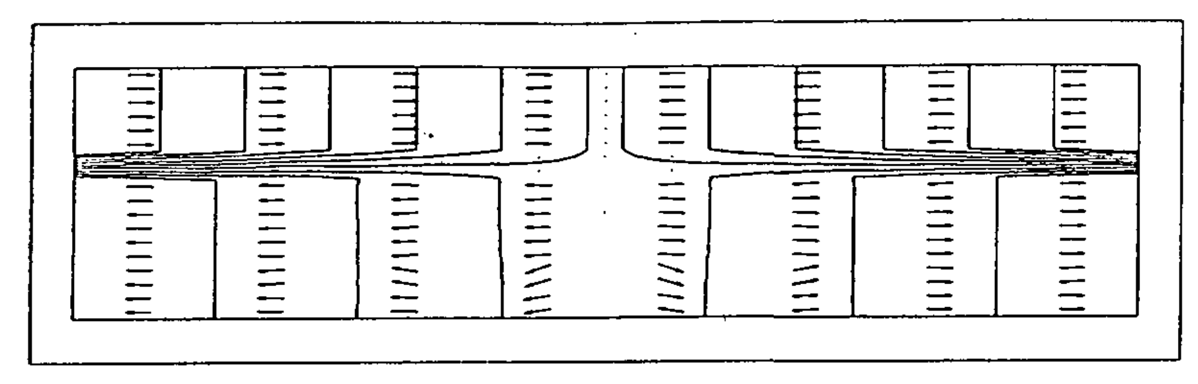
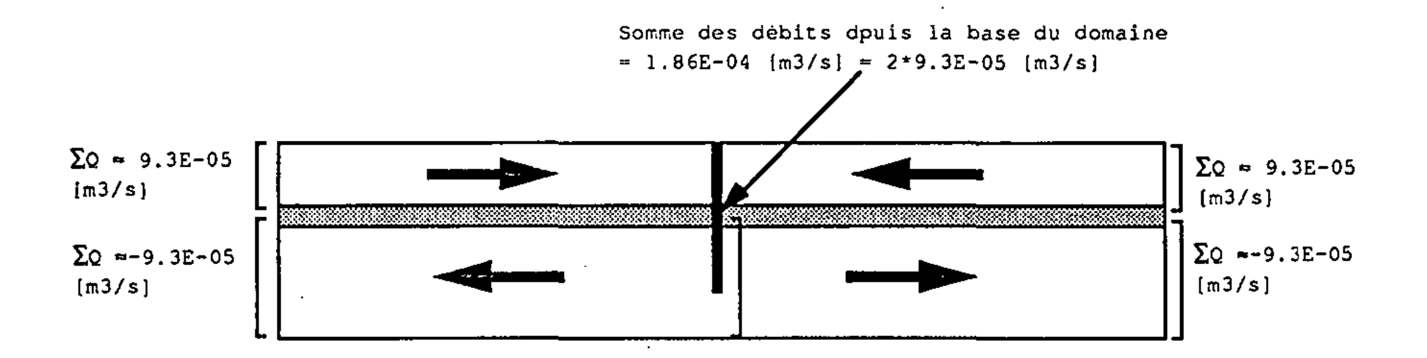


Figure 2: Modèle. Représentation des équipotentielles tous les 0.1 [m]
Les flèches indiquent la direction du vecteur vitesse.

On refait le calcul, cette fois en ajoutant comme conditions aux limites, les valeurs de potentiel calculées précedemment sur toute la verticale des éléments 1D (aussi en dessous d'eux). Ce deuxième modèle est identique au premier, mais le programme indique alors les débits nodaux à tous les nœuds où un potentiel a été imposé.
Aux nœuds des éléments 1D et en dessous, on obtient:

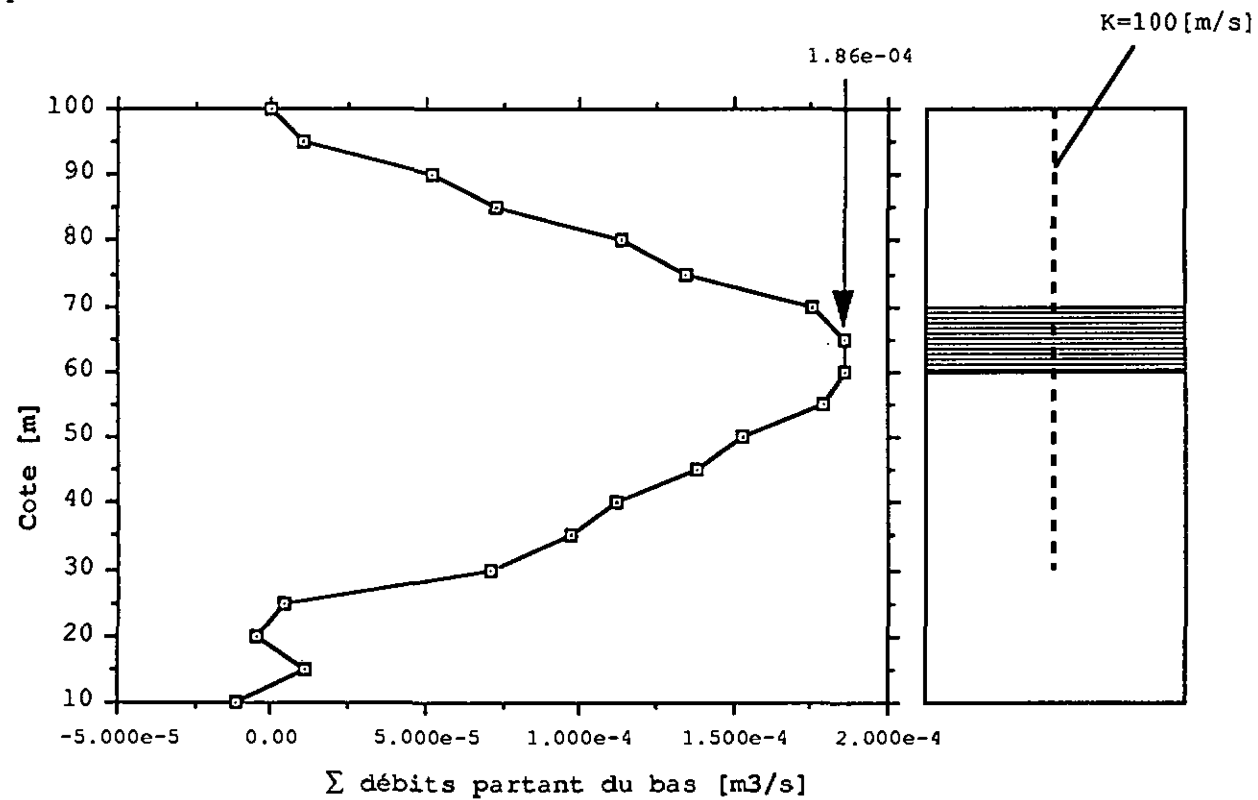
Cote [m]	Potentiel h [m]	Débits nodaux [m3/s]	Σ débits nodaux depuis le bas [m3/s]
100	492.379	-1.03e-5	2.00e-8
95	492.379	-4.14e-5	1.03e-5
90	492.379	-2.07e-5	5.17e-5
85	492.379	-4.14e-5	7.24e-5
80	492.379	-2.07e-5	1.14e-4
75	492.379	-4.14e-5	1.35e-4
70	492.379	-1.03e-5	1.76e-4
65	492.379	2.27e-13	1.86e-4
60	492.379	7.34e-6	1.86e-4
55	492.379	2.59e-5	1.79e-4
50	492.379	1.48e-5	1.53e-4
45	492.379	2.58e-5	1.38e-4
40	492.379	1.54e-5	1.12e-4
35	492.379	2.57e-5	9.70e-5
30	492.379	6.74e-5	7.13e-5
25	492.369	8.68e-6	3.88e-6
20	492.360	-1.54e-5	-4.80e-6
15	492.357	2.25e-5	1.06e-5
10	492.354	-1.19e-5	-1.19e-5

On peut alors dresser un bilan des débits, sur les bords et dans les éléments 1D. Schématiquement, on obtient:



Comme on pouvait s'y attendre, "l'eau" qui rentre dans le domaine en ressort aprés passage par les éléments 1D.

<u>Conclusion</u>: La somme des débits nodaux, depuis le bas (selon convention), à la verticale des éléments 1D, est une bonne approche des débits verticaux circulant dans la tranchée que l'on a voulu représenter par les éléments 1D.



De plus, la contribution des nœuds situés sous les éléments 1D est faible. La somme des débits nodaux uniquement pour les nœuds constitutifs des éléments 1D donne un résultat pratiquement identique.

Le passage à des éléments 1D dans un domaine 3D (piézomètre) se fait sans autre.

ANNEXE 5

Bibliographie

SPHINX: BIBLIOGRAPHIE

NOTE: Cette bibliographie est representative du niveau de complexite du domaine d'investigation et des modeles a disposition. Elle est donc sommaire et ne fait etat que des aspects et parametres figurant effectivement dans SPHINX.

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Les coordonnees geographiques moyennes de la region sont 46o48' de latitude nord et 6o21' de longitude est. Il s'agit d'un cone fluvio-glaciaire a tres faible pente, d'altitude moyenne = 810 m. Ce cone constitue le remplissage d'un vaste synclinal dont les flancs atteignent des altitudes de l'ordre de 1000 m.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

La province geologique est le Jura plisse. L'axe du synclinal (Jurassique) est oriente NNE - SSW; il est encadre par deux anticlinaux orientes de la meme maniere. Les petits cours d'eau circulant sur le cone fluvio-glaciaire s'ecoulent vers le nord.

STRATIGRAPHIE

Le Jurassique est represente par des calcaires marneux d'une puissance moyenne de 200 m. Des plaquages morainiques attribues au Wurm le recouvrent localement; il s'agit de moraines frontales, interpretees comme des traces de l'extremite occidentale d'une calotte glaciaire.
Pour le quatemaire recent, les affleurement de surface ne montrent que des graviers, qui pourraient donc constituer la totalite du cone fluvio-glaciaire.
La cluse visible sur la carte topographique est la trace du cours d'eau ayant charie ces graviers.

ANNEXE 6

Fichiers decrivant D3

FICHIER DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.ELM

On peut ecrire des lignes de commentaires au dessus du mot-cle. Dans tous les fichiers, les mots cles sont en MAJUSCULES et sont encadres par des '*'. Ci-dessous reproduction partielle du fichier.

La structure du fichier est la suivante: En format libre,

```
    IELM NQ NP KR NAR     (NIC(i),i=1,KR)
 ou:  IELM    = numero de l'element
      NQ      = numero de classe d'alimentation distribuee
      NP      = numero de classe de permeabilite (et tous les autres champs)
      KR      = nombre de noeuds constituant l'element
      NAR     = nombre d'aretes de l'element
      NIC     = numeros des noeuds constituant l'element (en commencant par un
                noeud coin de la face inferieure)
```

```
  *ELEMENTS*
      1  1  1  8  4         1       2       3       4       5       6       7       8
   2001  2  1 20 12      4001    4002    4003    4004    4005    4006    4007    4008
                         2001    2003    2005    2007
                            1       2       3       4       5       6       7       8
   4001  2  2 20 12      8001    8002    8003    8004    8005    8006    8007    8008
                         6001    6003    6005    6007
                         4001    4002    4003    4004    4005    4006    4007    4008
   6001  2  4 20 12     12001   12002   12003   12004   12005   12006   12007   12008
                        10001   10003   10005   10007
                         8001    8002    8003    8004    8005    8006    8007    8008
   8001  2  4 20 12     16001   16002   16003   16004   16005   16006   16007   16008
                        14001   14003   14005   14007
                        12001   12002   12003   12004   12005   12006   12007   12008
      2  1  1  8  4         3       9      10      11      12      13       5       4
   2002  2  1 20 12      4003    4009    4010    4011    4012    4013    4005    4004
                         2003    2010    2012    2005
                            3       9      10      11      12      13       5       4
   4002  2  2 20 12      8003    8009    8010    8011    8012    8013    8005    8004
                         6003    6010    6012    6005
                         4003    4009    4010    4011    4012    4013    4005    4004
   6002  2  4 20 12     12003   12009   12010   12011   12012   12013   12005   12004
                        10003   10010   10012   10005
                         8003    8009    8010    8011    8012    8013    8005    8004
   8002  2  4 20 12     16003   16009   16010   16011   16012   16013   16005   16004
                        14003   14010   14012   14005
                        12003   12009   12010   12011   12012   12013   12005   12004
      3  1  1  6  3         3      14      15      16      10       9
   2003  2  1 15  9      4003    4014    4015    4016    4010    4009
                         2003    2015    2010
                            3      14      15      16      10       9
   4003  2  2 15  9      8003    8014    8015    8016    8010    8009
                         6003    6015    6010
                         4003    4014    4015    4016    4010    4009
   6003  2  4 15  9     12003   12014   12015   12016   12010   12009
                        10003   10015   10010
```

ANNEXE 6

					8003	8014	8015	8016	8010	8009		
8003	2	4	15	9	16003	16014	16015	16016	16010	16009		
					14003	14015	14010					
					12003	12014	12015	12016	12010	12009		
4	1	4	8	4	15	17	18	19	20	21	10	16
2004	2	4	20	12	4015	4017	4018	4019	4020	4021	4010	4016
					2015	2018	2020	2010				
					15	17	18	19	20	21	10	16
.												
.												
.												
.												
.												
29	1	3	8	4	99	98	90	94	93	101	102	103
2029	2	3	20	12	4099	4098	4090	4094	4093	4101	4102	4103
					2099	2090	2093	2102				
					99	98	90	94	93	101	102	103
4029	2	3	20	12	8099	8098	8090	8094	8093	8101	8102	8103
					6099	6090	6093	6102				
					4099	4098	4090	4094	4093	4101	4102	4103
6029	2	3	20	12	12099	12098	12090	12094	12093	12101	12102	12103
					10099	10090	10093	10102				
					8099	8098	8090	8094	8093	8101	8102	8103
8029	2	4	20	12	16099	16098	16090	16094	16093	16101	16102	16103
					14099	14090	14093	14102				
					12099	12098	12090	12094	12093	12101	12102	12103

FICHIER DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.COR

```
Commentaires autorises au dessus du mot-cle.
Sous le mot-cle:     lere ligne: Facteurs multiplicatifs sur X, Y et Z
                     Lignes suivantes: numero du noeud, x, y, z.

Le fichier doit etre arrange par ORDRE des numeros de noeuds.
Ci-dessous reproduction partielle du fichier.

  *COORDINATES*
  1.000000        1.000000        1.000000
      1     901042.25     220125.91      810.00
      2     901435.50     220025.73      810.00
      3     901829.31     219941.89      810.00
      4     901812.75     220569.61      810.00
      5     901852.50     220994.23      810.00
      6     901530.63     220938.59      810.00
      7     901156.94     220884.14      810.00
      .
      .
      .
    102     904014.81     222539.05      845.00
    103     903753.31     222485.63      825.00
   2001     901042.25     220125.91      806.00
   2003     901829.31     219941.89      805.40
   2005     901852.50     220994.23      805.90
   2007     901156.94     220884.14      809.90
      .
      .
      .
   2099     903507.75     222419.88      809.90
   2102     904014.81     222539.05      844.90
   4001     901042.25     220125.91      802.00
   4002     901435.50     220025.73      801.50
   4003     901829.31     219941.89      800.80
   4004     901812.75     220569.61      802.30
   4005     901852.50     220994.23      801.80
   4006     901530.63     220938.59      804.60
   4007     901156.94     220884.14      809.80
      .
      .
      .
   4102     904014.81     222539.05      844.80
   4103     903753.31     222485.63      824.80
   6001     901042.25     220125.91      784.50
   6003     901829.31     219941.89      780.30
   6005     901852.50     220994.23      782.10
   6007     901156.94     220884.14      809.70
    ...
    ...
    ...
    ...
    ...
  16102     904014.81     222539.05      721.60
  16103     903753.31     222485.63      720.00
```

FICHIER DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR

Commentaires autorises au dessusde chaque mot cle, mais pas a l'interieur d'un bloc de donnees.
Dans O3, le nombre de couches maximum est 4. Dans les modeles numeriques FEN1 et FEN2 (pompage longue duree ou de duree limitee) le nombre de classes d'equivalence dans les champs K, m et AD doit etre dimensionne au minimum a MAXCOUCHES + 2.
RAPPEL: La classe MAXCOUCHES+2 decrit K et m dans un element 1D vertical ajoute par MODI_RESEAU.FOR si le forage represente traverse completement un niveau donne. Sinon K et m sont obtenus par ponderation et correspondent a la classe MAXCOUCHES+1.

Ci-dessous, le fichier est complet, a l'exception des conditions aux limites, representees partiellement.

```
*PERMEABILITIES*
1  5.0E-03   0.0E-03   5.0E-03   0.0E-03   0.0E-03   5.0E-03
2  1.0E-06   0.0E-06   1.0E-06   0.0E-06   0.0E-06   1.0E-06
3  1.0E-04   0.0E-04   1.0E-04   0.0E-04   0.0E-04   1.0E-04
4  1.0E-05   0.0E-05   1.0E-05   0.0E-05   0.0E-05   1.0E-05
5  1.0E+01   0.0E+01   1.0E+01   0.0E+01   0.0E+01   1.0E+01   !MAXCOUCHES+1
6  1.0E+02   0.0E+02   1.0E+02   0.0E+02   0.0E+02   1.0E+02   !MAXCOUCHES+2
00/
*STORAGE COEFFICIENTS*
1  0.05
2  0.01
3  0.01
4  0.01
5  0.10  !MAXCOUCHES+1
6  1.00  !MAXCOUCHES+2
00/
*INFILTRATION RATES*
   1    1.0E-8
   2    0.0E-9
   3    0.0E-9
   4    0.0E-9
   5    0.0E-9          ! MAXCOUCHES+1
   6    0.0E-9          ! MAXCOUCHES+2
00/

*NODAL CONDITIONS*
          1          -1   809.0000
       2001          -1   809.0000
       4001          -1   809.0000
      .
      .
      .
          8          -1   809.2600
       4008          -1   809.2600
       8008          -1   809.2600
      12008          -1   809.2600
      16008          -1   809.2600
   00/
```

FICHIER DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.RES

Ce fichier est normalement produit par FEN1 (modele hydraulique en regime permanent), a la demande de l'operateur. C'est le meme programme qui est utilise dans SPHINX pour les essais de pompage de longue duree. Le seul mot-cle utilise est celui precedent les resultats. FEN1

presente les resultats par ordre croissant de numero de noeud, ce qui est un condition de fonctionnement du logiciel.

```
***********************************************
*  Program "FEN1"     (CHYN - NEUCHATEL)        *
*  Finite Element Model - Steady state flow     *
*  version: 10-03-90                            *
***********************************************


 INPUT FILES:
 ************ SCRATCH:[TACHER]SPHINX.ELM;17
              SCRATCH:[TACHER]SPHINX.COR;16
              SCRATCH:[TACHER]SPHINX.PAR;26
 OUTPUT FILE:
 ************ SCRATCH:[TACHER]SPHINX.RES;1


 3-D MODEL (QUADRATIC ELEMENTS)
 ******************************

 CONTROL PARAMETERS:
 *******************
 MNNIC=    1      MXNIC=16103     MXNQ=  2     MXNP=  4
 MAXLM=  145      NDACT=  630     MXPA=147


 PERMEABILITIES:
 ***************
    1      0.50000E-02   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.50000E-02   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.00000E+00   0.50000E-02/
    2      0.10000E-05   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.10000E-05   0.00000E+00
           0.00000E-00   0.00000E+00   0.10000E-05/
    3      0.10000E-03   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.10000E-03   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.00000E+00   0.10000E-03/
    4      0.10000E-04   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.10000E-04   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.00000E+00   0.10000E-04/
    5      0.10000E+02   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.10000E+02   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.00000E+00   0.10000E+02/
    6      0.10000E+03   0.00000E+00   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.10000E+03   0.00000E+00
           0.00000E+00   0.00000E+00   0.10000E+03/

 INFILTRATION RATES:
 *******************
    1       0.1000000E-07
    2       0.0000000E+00
    3       0.0000000E+00
    4       0.0000000E+00
    5       0.0000000E+00
    6       0.0000000E+00

 NODAL CONDITIONS:
 *****************
    1          1 -1        0.8090000E+03
    2       2001 -1        0.8090000E+03
    3       4001 -1        0.8090000E+03
```

```
.                                          / Echo des conditions aux limites
.                                          / cf DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR
   248          8 -1      0.8092600E+03
   249       4008 -1      0.8092600E+03
   250       8008 -1      0.8092600E+03
   251      12008 -1      0.8092600E+03
   252      16008 -1      0.8092600E+03


  *RESULTS*          (HMN= 0.8062000E+03  HMX= 0.8240000E+03)
  *********
      1 -1  809.000  0.167E-02        2 -1  809.000 -0.744E-02        3 -1  809.100 -0.245E-03
      4  0  808.987  0.483E-02        5  0  808.797 -0.178E-02        6  0  809.052  0.359E-02
      7 -1  809.500  0.463E-02        8 -1  809.260  0.167E-02        9  0  809.099  0.295E-02
     10  0  809.030 -0.107E-02       11  0  808.961  0.233E-02       12  0  808.555 -0.929E-03
     13  0  808.613  0.343E-02       14 -1  809.200  0.395E-02       15 -1  809.200 -0.359E-02
     16  0  809.218  0.135E-02       17 -1  813.000 -0.867E-03       18 -1  817.000  0.961E-04
     19 -1  814.000 -0.796E-03       20 -1  810.000  0.870E-02       21  0  809.410  0.115E-02
     22 -1  813.000  0.627E-03       23 -1  815.000 -0.325E-02       24  0  808.910  0.236E-02
     25 -1  808.000  0.961E-02       26 -1  812.000 -0.206E-02       27  0  808.286  0.256E-02
     28  0  807.514 -0.846E-03       29  0  807.713  0.156E-02       30  0  808.135  0.119E-02
     31  0  807.729 -0.537E-03       32  0  807.580  0.150E-02       33  0  808.974  0.556E-03
     34  0  808.862 -0.175E-03       35  0  808.662  0.576E-03       36  0  808.508 -0.310E-03
     37  0  808.531  0.616E-03       38  0  809.123  0.489E-03       39  0  808.983 -0.264E-03
     40  0  808.916  0.423E-03       41 -1  809.500 -0.129E-01       42 -1  810.000  0.919E-02
     43  0  809.443  0.573E-03       44  0  807.071  0.753E-03       45 -1  806.500 -0.108E-02
     46 -1  807.000 -0.252E-01       47  0  807.266  0.672E-03       48  0  806.982 -0.218E-03
.
.
.
  16089  0  809.333  0.000E+00    16090  0  809.420  0.000E+00    16091  0  808.816  0.000E+00
  16092  0  812.907  0.000E+00    16093 -1  815.000 -0.188E-02    16094  0  810.976  0.000E+00
  16095 -1  816.200  0.659E-02    16096 -1  807.000  0.602E-03    16097  0  807.357  0.000E+00
  16098  0  808.854  0.000E+00    16099 -1  808.500  0.407E-03    16100 -1  807.100 -0.143E-02
  16101 -1  816.000  0.504E-02    16102 -1  815.000 -0.199E-02    16103 -1  813.000  0.829E-03


  RECHARGE/DISCHARGE BALANCE    = -0.9377085E-10 [M3/S]
  IMPOSED DISTRIBUTED R/D       =  0.5071029E-01 [M3/S]
  IMPOSED NODAL R/D             =  0.0000000E+00 [M3/S]
  CALCULATED R/D AT FIXED HEADS = -0.5071029E-01 [M3/S]
  TOTAL IMPOSED INFILTR. AREA   =  0.5071029E+01 [KM2]
  (ON 1-D: 0.0000000E+00 [KM2],   ON 2-D: 0.5071029E+01 [KM2])
```

DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.LIBRAIRIE]CORRESPONDANCE.FOR

```
      SUBROUTINE CORRESPONDANCE(          I,
     &                                    LEGTXT,
     &                                    PERM  ,
     &                                    STO   ,
     &                                    VALRHO,
     &                                    FROTT ,
     &                                    ISTYL ,
     &                                    INTS  ,
     &                                    SPHINXTOT,
     &                                    SPHINXETAT,MARGE,ETATXT,
     &                                    X_URBAN_ZONE,Y_URBAN_ZONE)

      IMPLICIT NONE

C ...................
      PARAMETER NBITEM=10     !Nombre d'articles intervenant dans le devis.
C ...................
```

```
C       Ci-dessous, seules les valeurs de sorties (i.e LEGTXT) doivent etre
C       en accord avec DISK$SPHINX:[PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT

        CHARACTER*30   LCL$LEGTXT(4)
        CHARACTER      LEGTXT*30
        CHARACTER*40   ETATXT(NBITEM)
        REAL*8         LCL$PER(6,4)
        REAL*8         PERM(6)
        REAL*8         LCL$STO(4)
        REAL*8         STO
        REAL           LCL$VALRHO(4)
        REAL           VALRHO
        REAL           LCL$FROTT(4)
        REAL           FROTT
        REAL*4         SPHINXTOT
        REAL*4         SPHINXETAT(NBITEM)
        REAL*4         MARGE
        REAL*8         X_URBAN_ZONE(50)
        REAL*8         Y_URBAN_ZONE(50)
        INTEGER        I,J
        INTEGER        LCL$ISTYL(4)
        INTEGER        ISTYL
        INTEGER        LCL$INTS(4)
        INTEGER        INTS

C______________________________________________________________________________
C
C        TABLEAU DES VALEURS & CARACTERISTIQUES ASSIGNEES AUX CLASSES
C        D'EQUIVALENCE DU DOMAINE REALISTE DE SPHINX.
C______________________________________________________________________________
C
C       Remarque: Le modele numerique fonctionne avec K et m
C       lus dans DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR. Les K et m figurant ici
C       ne sont utiles que pour le permeametre et l'outil vitesse reelle;
C       ils doivent etre identiques dans les 2 fichiers. Lesc classes
C       MAXCOUCHES+1 et MAXCOUCHES+2 ne doivent pas figurer ici, alors
C       qu'elles sont dans SPHINX.PAR.
C
C       Les alimentations distribuees ne figurent que dans le fichier
C       de parametres DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.PAR
C
C


*.......Lithologie.........................................................

*        Limites de texte:     '<--------------------------->'

        LCL$LEGTXT( 1)=       ' Graviers (fluvioglaciaire)    '
        LCL$LEGTXT( 2)=       ' Argiles lacustres             '
        LCL$LEGTXT( 3)=       ' Moraine recente (Wurm)        '
        LCL$LEGTXT( 4)=       ' Calcaires marneux(Jurassique)'

        LEGTXT=LCL$LEGTXT(I)

*.......Permeabilites...........................................................
        LCL$PER(1, 1)=        5.0E-03
        LCL$PER(2, 1)=        0.0E-03     !              | 1 2 4 |
        LCL$PER(3, 1)=        5.0E-03     !       [K]=   |   3 5 |
        LCL$PER(4, 1)=        0.0E-03     !              |     6 |
```

```
      LCL$PER(5, 1)=        0.0E-03
      LCL$PER(6, 1)=        5.0E-03

      LCL$PER(1, 2)=        1.0E-06
      LCL$PER(2, 2)=        0.0E-06
      LCL$PER(3, 2)=        1.0E-06
      LCL$PER(4, 2)=        0.0E-06
      LCL$PER(5, 2)=        0.0E-06
      LCL$PER(6, 2)=        1.0E-06

      LCL$PER(1, 3)=        1.0E-04
      LCL$PER(2, 3)=        0.0E-04
      LCL$PER(3, 3)=        1.0E-04
      LCL$PER(4, 3)=        0.0E-04
      LCL$PER(5, 3)=        0.0E-04
      LCL$PER(6, 3)=        1.0E-04

      LCL$PER(1, 4)=        1.0E-05
      LCL$PER(2, 4)=        0.0E-05
      LCL$PER(3, 4)=        1.0E-05
      LCL$PER(4, 4)=        0.0E-05
      LCL$PER(5, 4)=        0.0E-05
      LCL$PER(6, 4)=        1.0E-05


      DO 1 J=1,6
       PERM(J)=LCL$PER(J,I)
 1    CONTINUE


*.......Porosites.........................................................
      LCL$STO( 1)=          0.05
      LCL$STO( 2)=          0.01
      LCL$STO( 3)=          0.01
      LCL$STO( 4)=          0.01

      STO=LCL$STO(I)

*.......Resistivites electriques..........................................
      LCL$VALRHO( 1)=     250.00
      LCL$VALRHO( 2)=      40.00
      LCL$VALRHO( 3)=      80.00
      LCL$VALRHO( 4)=     600.00

      VALRHO=LCL$VALRHO(I)




*.......Resistance a l'avancement des forages pousses 2"....................
*.......L'unite est le nbre de coups pour traverser 1 metre.................
      LCL$FROTT( 1)=      100.00
      LCL$FROTT( 2)=       70.00
      LCL$FROTT( 3)=      500.00
      LCL$FROTT( 4)=     1000.00

      FROTT=LCL$FROTT(I)

*.......Figures GKS........................................................
      LCL$INTS ( 1)=        3
      LCL$INTS ( 2)=        1
      LCL$INTS ( 3)=        3
      LCL$INTS ( 4)=        3
```

```
      INTS=LCL$INTS(I)


      LCL$ISTYL( 1)=        -3
      LCL$ISTYL( 2)=        -1
      LCL$ISTYL( 3)=        -2
      LCL$ISTYL( 4)=       -18

      ISTYL=LCL$ISTYL(I)


C______________________________________________________________________
C
C     BUDGET & DEVIS
C______________________________________________________________________

C     Montant total du devis que preconise SPHINX ($)
      SPHINXTOT=52500.

C     Montant (en % du montant total) optimum reserve a chaque operation.
C     Le total doit etre 100.
      SPHINXETAT( 1)= 001.90476
      SPHINXETAT( 2)= 007.61904
      SPHINXETAT( 3)= 003.80952
      SPHINXETAT( 4)= 014.28571
      SPHINXETAT( 5)= 028.57142
      SPHINXETAT( 6)= 009.52380
      SPHINXETAT( 7)= 005.71428
      SPHINXETAT( 8)= 013.33333
      SPHINXETAT( 9)= 006.66666
      SPHINXETAT(10)= 008.57148

C     Marge de manoeuvre (en %) valable pour le montant total ainsi que
C     pour le pourcentage souhaite pour chaque type d'operation.
      MARGE=15.
```

```
C       VALEURS A CHANGER EN CAS DE RAJOUT/SUPPRESSION D'OUTILS.
C       DANS CE CAS, MODIFIER AUSSI LE PARAMETRE NBITEM DANS TOUT LE
C       LOGICIEL AINSI QUE LE VECTEUR SPHINXETAT.

*        Limites de texte:    '<-------------------------------------->'

        ETATXT( 1)=           '  1  Bibliographie & reconnaissance    :'
        ETATXT( 2)=           '  2  Traines electriques               :'
        ETATXT( 3)=           '  3  Sondages electriques              :'
        ETATXT( 4)=           '  4  Piezometres 2"                    :'
        ETATXT( 5)=           '  5  Piezometres 6"                    :'
        ETATXT( 6)=           '  6  Essais de pompage                 :'
        ETATXT( 7)=           '  7  Essais de flowmetre               :'
        ETATXT( 8)=           '  8  Outil Vitesse reelle              :'
        ETATXT( 9)=           '  9  Redaction du rapport              :'
        ETATXT(10)=           ' 10  Divers et imprevus                :'


C-----------------------------------------------------------------------
C       ZONE_URBAINE    (Polygone)
C-----------------------------------------------------------------------

        X_URBAN_ZONE( 1)    =        903220.       !Urban zone (if one) is defined
        X_URBAN_ZONE( 2)    =        903070.       !by a polygon of max 50 points.
        X_URBAN_ZONE( 3)    =        903000.       !Points are ordered: They
        X_URBAN_ZONE( 4)    =        902900.       !follow in list as in space
        X_URBAN_ZONE( 5)    =        902800.       !in that two following points
        X_URBAN_ZONE( 6)    =        902750.       !in list are linked in space
        X_URBAN_ZONE( 7)    =        902830.       !by a segment.
        X_URBAN_ZONE( 8)    =        903050.       !Clockwise OR counterclockwise.
        X_URBAN_ZONE( 9)    =        903170.
        X_URBAN_ZONE(10)    =        903220.       !Last point is = first one!

        Y_URBAN_ZONE( 1)    =        220500.
        Y_URBAN_ZONE( 2)    =        220550.
        Y_URBAN_ZONE( 3)    =        220720.
        Y_URBAN_ZONE( 4)    =        220740.
        Y_URBAN_ZONE( 5)    =        220600.
        Y_URBAN_ZONE( 6)    =        220450.
        Y_URBAN_ZONE( 7)    =        220350.
        Y_URBAN_ZONE( 8)    =        220400.
        Y_URBAN_ZONE( 9)    =        220380.
        Y_URBAN_ZONE(10)    =        220500.

        RETURN
        END
```

DISK$SPHINX:[FILES]SPHINX.CLIMAT

```
Commentaires autorises au dessus du mot-cle.
Colonne 1: numero du jour de l'annee
Colonne 2: temperature moyenne [oC]
Colonne 3: precipitations [mm/jour]

*CLIMATIC DATAS*
    1      3.5     15.9
    2     -0.4     22.6
    3     -3.1      4.7
    4     -5.7      0.0
    5     -2.0      9.0
       .
       .
       .
  355      7.4      0.0
  356      3.7      0.1
  357      1.8      0.0
  358      5.9      0.0
  359      6.7      0.0
  360      8.2      0.0
  361      8.0      0.0
  362      5.0      0.0
  363      1.9      0.9
  364      3.9     12.8
  365      0.9      5.5
```

Annexe 7

```
      SUBROUTINE DOMAIN$PARAMETERS(X_EXPLOITATION,Y_EXPLOITATION,
     &            DISTANCE_EXPLOITATION,LIB$THICK,LIB$K,LIB$KMINI)

      INCLUDE '[-.PROGRAMMES.CODES]DECLARATION.TXT'


C     Includes any characteristics of the domain that are need by
C     MAIN$EXP.
C     Should be modified for any new domain used in by SPHINX.

      LIB$KMINI                =     2.0E-03
      X_EXPLOITATION           =     903000.     !Coordinates of water
      Y_EXPLOITATION           =     220500.     !distribution center.
      DISTANCE_EXPLOITATION    =     1600. ![m] Reasonable distance to
                                           !distribution center for
                                           !definitive eploitation borehole

C     This is the CSTM:

      LIB$THICK( 1)       =      10.    ! Gravels
      LIB$THICK( 2)       =      15.    ! Morain
      LIB$THICK( 3)       =      10.    ! Clays
      LIB$THICK( 4)       =       2.    ! Gravels again (maybe a lens)
      LIB$THICK( 5)       =     100.    ! Calcareous

      LIB$K( 1)           =      5.0E-3
      LIB$K( 2)           =      1.0E-5
      LIB$K( 3)           =      1.0E-6
      LIB$K( 4)           =      1.0E-5
      LIB$K( 5)           =      5.0e-4

      END
```

ANNEXE 8

Exemple complet d'exercice.
Présentation d'un devis, d'un budget et de travaux en cours d'exercice.

Devis initial de l'utilisateur GEHDOERF, réalisé et validé le 5 mai 1992:

Nom: GEHDOERF

1	Bibliographie & reconnaissance	:	1000. $
2	Traines electriques	:	4000. $
3	Sondages electriques	:	2250. $
4	Piezometres 2"	:	7500. $
5	Piezometres 6"	:	15555. $
6	Essais de pompage	:	5000. $
7	Essais de flowmetre	:	3200. $
8	Outil Vitesse reelle	:	7000. $
9	Redaction du rapport	:	3500. $
10	Divers et imprevus	:	4200. $

-----> DEVIS VALIDE <----- Acceptation le 5-MAY-1992 11:12

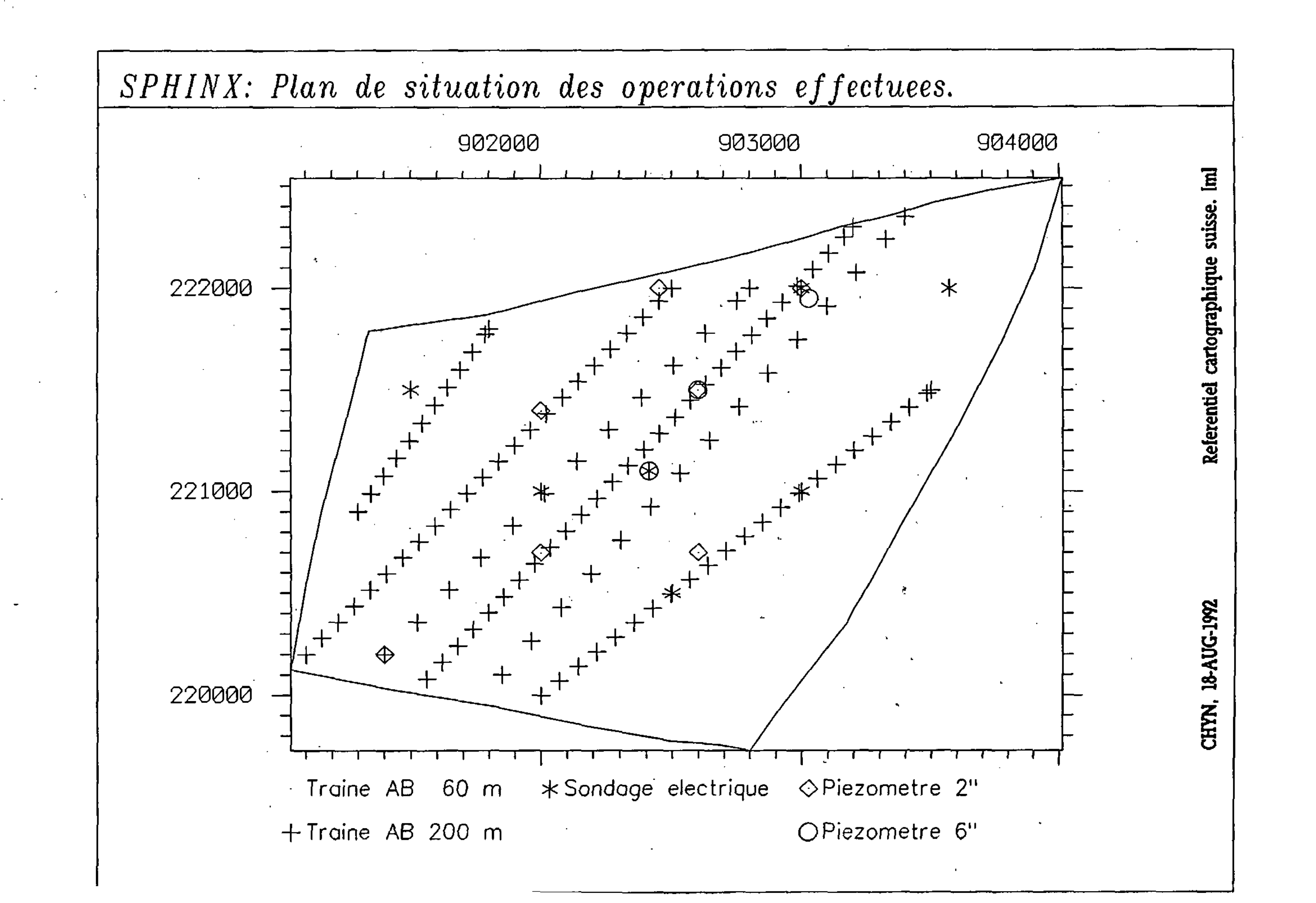
Etat du budget le 18 août 1992:

Nom: GEHDOERF
Date de mise a jour: 18-AUG-1992 11:06:2
Montant total du devis : 53205

		Nbre	Prix unit.	Total
Traines electriques (par station)	:	117	50	5850
Sondages electriques effectues	:	6	200	1200
Metres de sondage par battage 2"	:	75	110	8750
Metres de sondage carot. 6" (non surv.)	:	100	240	25000
Metres de sondage carot. 6" (surv.)	:	0	310	0
Metres de sondage destr. 6" (non surv.)	:	15	200	4000
Essais de pompage (forfait)	:	3	1000	3000
Tournees piezometriques (par piezo.)	:	0	20	0
Outil Vitesse reelle	:	1	1000	1000
Utilisation du flowmetre	:	0	1500	0

			TOTAL:	48800
			SOLDE:	4405

Les opérations effectuées correpondant à ces dépenses sont représentées graphiquement comme suit (utilitaire 9.3):


SPHINX: Plan de situation des operations effectuees.
902000
903000
904000
222000
221000
220000
Traine AB 60 m
Sondage electrique
Piezometre 2"
Traine AB 200 m
Piezometre 6"
Referentiel cartographique suisse. [m]
CHYN, 18-AUG-1992

Commentaires:

L'utilisateur a commencé par une couverture systématique du domaine avec des trainés AB 200m. L'orientation NE-SW de ces trainés est favorable au recoupement d'un éventuel chenal graveleux (cf cartes topographique et géologique). Arrivé à ce stade, l'œil du maître détecte une densité suffisante et ne conseille pas de poursuivre les trainés. Par ailleurs, les dépenses concernant ce type d'investigation atteignent 5850 $ au lieu des 4000 $ prévus.

Par la suite, 6 sondages électriques ont été faits pour étalonner l'interprétation des trainés. Le sondage placé au NW du domaine, à la limite gravier-calcaire, est paramétrique et tend à déterminer la résistivité électrique vraie du calcaire. Seulement 1200 $ ont été dépensés pour les sondages, au lieu des 2250 $ prévus, ce qui permet de re-équilibrer le budget.

Sept piézomètres d'observation 2" ont alors été installés de manière à déterminer le gradient global de l'aquifère de surface. Leur localisation exacte est guidée par les résultats de la géophysique.

Le lieu d'implantation des 3 piézomètres 6" a été choisi sur la base de toutes les informations collectées jusque là. Deux d'entre eux sont carottés, le troisième est destructif. Ils touchent principalement les graviers de surface. Le premier forage carotté coïncide exactement avec l'emplacement d'un sondage électrique, ce qui permet un nouveau calage de tous les sondages. Le second forage est destructif; son emplacement est choisi par l'allure du trainé électrique. Le forage situé le plus au NE est carotté bien qu'il y ait un sondage électrique et 2 trainés à proximité. De plus, il y a un piézomètre d'observation à moins de 50 [m]. Cet endroit semble présenter un intérêt particulier pour l'utilisateur. Les 3 sondages 6" ont fait l'objet d'un pompage d'essai de durée limité. Leur interprétation doit donner une appréciation des valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement des graviers.

A ce stade de la prospection, le budget est presque épuisé. Il semblerait judicieux de dépenser le solde pour un essai de pompage de longue durée et l'utilisation du flowmètre. Un doute subsistera quant aux temps de transit d'éventuelles substances polluantes en provenance de la zone urbaine puisque l'outil Vitesse réelle ne pourra être utilisé. Ces temps de transit pourront cependant être estimés avec le gradient tel qu'il est connu ainsi qu'avec les valeurs calculées de S et K.

D'une manière générale, la prospection a été menée en vue d'une exploitation de l'aquifère de surface, qui présente les ressources en eau les plus manifestes. Vu les conditions budgétaires, peu d'informations ont été obtenues sur la structure et les éventuelles ressources des formations sous-jacentes.